

# Entwicklung eines MEMS Drucksensor- Prozessmoduls für die Post-CMOS Integration

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften  
Abteilung Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Universität Duisburg-Essen

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

genehmigte Dissertation

von

Qiang Wang  
aus  
Fushun, VR China

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Holger Vogt
  2. Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. Roland Schmechel
- Tag der mündlichen Prüfung: 16. Februar 2012



## Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde während meiner Tätigkeit als Doktorand am Fraunhofer Institut für mikroelektronische Schaltungen und Systeme (Fraunhofer IMS) angefertigt. Ich freue mich, an dieser Stelle den Menschen aufrichtig danken zu können, die mir diese Promotionsarbeit ermöglicht und mich nach besten Kräften unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Holger Vogt, der meine Arbeit betreut und gefördert. Seine wissenschaftliche Anregungen und allseitige Unterstützungen sind bestimmend für die Fertigstellung dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr. rer. nat. Roland Schmechel danke ich für seine Bereitschaft der Übernahme des zweiten Gutachters dieser Dissertation. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. István Erlich bedanke ich mich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Bei den MitarbeiterInnen von Fraunhofer IMS möchte ich mich für die gute Zusammenarbeit bedanken. Herrn Dr. Andreas Göhlich und Herrn Dr. Khiem Trieu gilt mein Dank für die hilfsreichen Diskussionen und großzügigen Stützen. Ich bedanke mich herzlich für die selbstlosen Hilfestellungen von Herrn Klaus Debusmann. Weiterhin gilt mein Dank Herrn Dr. Marco Ruß sowie für die fachlichen Ratschläge als auch für die Verbesserungen in puncto Formatierung. Ebenso herzlich möchte ich mich bei Frau Renate Kirtz und Frau Marina Wirtz für die zahlreichen Rasterelektronenmikroskopie- und energiedispersive Röntgenspektroskopie-Untersuchungen bedanken.

Besonders danke ich den Kollegen am Fraunhofer IMS, die bei den sprachlichen Korrekturen meiner Dissertation tatkräftig geholfen haben. Sie sind Herr Dr. Andreas Göhlich, Herr Dr. Marco Ruß, Herr Dr. Jochen Bauer, Herr Martin Petermann, Herr Dr. Daniel Würfel und Herr Dr. Piotr Kropelnicki.

Weiterhin gilt mein Dank Herrn Prof. Dr. rer. nat. Wilfried Mokwa, Herrn Dr. Gerald Ganske und Herrn Sebastian Schmelzer von Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, für die wissenschaftlichen Vorschläge, die Durchführung vom Tetramethylammoniumhydroxid Ätzen und die Ermöglichung meiner Benutzung ihrer Röntgenbeugungsanlage.

Ein ganz besonderer Dank gilt meiner Mutter, meinem Bruder, meiner Schwester und allen Freunden, die mich durch meine Arbeit begleitet und mir große geistige Stützen gegeben haben. Zuletzt sei all denen gedankt, die wegen limitierter Länge dieser Danksagung nicht erwähnt werden können.





## Kurzfassung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung von Prozessen, Materialien und Charakterisierungsmethoden für die monolithische Integration von kapazitiven Druckdosen mit CMOS Schaltungen. Hierfür wurden verschiedene Ansätze entworfen und theoretisch verglichen. Die auf Niedertemperatur-Abscheidung von SiGe, Ge und a-Si, und auf plasma-aktiviertem Wafer Bonden (PAWB) basierende Post-CMOS-Integration wurde experimentell untersucht. Dazu wurden PECVD- und CVD-Abscheidungsverfahren von polykristallinem und mikrokristallinem SiGe und Ge entwickelt. Die Eigenschaften von SiGe-, Ge- und a-Si Schichten wurden bei verschiedenen Depositionsparametern charakterisiert. Verschlussene Testdruckdosen mit SiGe- oder Ge-Membran und verschlossene Testdruckdosen basierend auf dem PAWB Prozess, wurden hergestellt und charakterisiert. Für das Abschätzen des Innenvakuums der verschlossenen Druckdose wurde eine Methode entworfen und eingesetzt. Durchkontaktierungen aus Poly-SiGe und Poly-Ge, die die elektrische Verbindung zur unterliegenden Metall-Leiterbahn bilden, wurden hergestellt und charakterisiert. Aufgrund der experimentellen Ergebnisse wurde nachgewiesen, dass das Integrationskonzept mit SiGe- oder Ge-Druckdosen-Membran eines der am besten geeigneten Integrationsverfahren für die monolithische Integration der Druckdose mit der CMOS-Schaltung ist. Für das Integrationsverfahren mit PAWB müsste ein erheblicher zusätzlicher Entwicklungsaufwand erbracht werden. Das Konzept mit a-Si-Druckdosen-Membran besitzt keine Vorteile gegenüber dem Konzept mit SiGe oder Ge Membran und dem Konzept mit PAWB.

Mit zunehmendem gesamten Gasfluss bei der PECVD-Abscheidung von SiGe- oder Ge-Schichten wird die Verweilzeit der Gasteilchen in der Prozesskammer verringert. Die verringerte Verweilzeit der Gasteilchen führt zu einem erhöhten Anteil beweglicherer Radikale auf der Oberfläche und damit zu einer besseren Kristallinität der abgeschiedenen Schicht. Aufgrund dieses Phänomens wurde eine PECVD-Abscheidungsverfahren für die Abscheidung der SiGe- oder Ge-Schichten mit erhöhtem gesamten Gasfluss entwickelt. Mittels dieser Abscheidungsverfahren wurde Poly-SiGe mit einem spezifischen Widerstand von  $1,4\text{m}\Omega\text{cm}$  und einem Ge-Gehalt von circa 80at.% bei einer Substrat-Temperatur von  $375^\circ\text{C}$  abgeschieden. Dieser Widerstand ist erheblich niedriger als bei Abscheidung unter bisher genutztem Gasfluss. REM- und XRD-Messungen bestätigten die erhöhte Kristallinität. Ein Kontaktsystem von Poly-SiGe oder Poly-Ge auf Metall wurde entwickelt. Die Vorteile der Durchkontaktierung aus Poly-SiGe oder -Ge sind der vereinfachte Integrationsprozess und der große Strom, der durch die Durchkontaktierung fließen darf ( $>5\text{mA}$  bei  $1,5\mu\text{m}^2$  Kontaktfläche).

## Abkürzungsverzeichnis

$d$	Abstand
$e$	Elementarladung
$E$	Elektrisches Feld
$k$	Boltzmann-Konstante
$n_e$	Elektronen-Dichte
$n_i$	Ionen-Dichte
$NGGFR$	Die auf 1364sccm normalisierte gesamte Gasflussrate
$p$	Druck
$PAWB$	Plasma-aktiviertem Wafer Bonden
$q$	Menge von elektrischen Ladungen
$\vec{r}$	Ortsvektor
$t_V$	Verweilzeit des Gasteilchens
$T_e$	Temperatur der Elektronen
$U$	Energie
$UGV$	Das ursprüngliche Ge Verhältnis
$USGV$	Das ursprüngliche SiGe Verhältnis
$\epsilon_0$	Permittivität des Vakuums
$\epsilon_r$	Relative Permittivität

$\lambda_D$	Debye-Länge
$\zeta$	Gasflussrate
$\rho$	Dichte von elektrischen Ladungen
$\Phi$	Elektrisches Potential



## Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung .....</b>	<b>v</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>vi</b>
<b>1 Der aktuelle Stand der Drucksensor-Technologien .....</b>	<b>1</b>
1.1 Kapazitiver Drucksensor .....	2
1.2 piezoresistiver Drucksensor .....	3
1.3 resonante und andere Drucksensoren .....	4
<b>2 Motivation: Warum die Post-CMOS Integration des kapazitiven Drucksensors? .....</b>	<b>7</b>
2.1 Vergleich der verschiedenen Drucksensor-Konzepte .....	7
2.2 Motivation: Warum Post-CMOS Integration? .....	9
2.3 Zusammenfassung .....	14
<b>3 Einige theoretische Grundlagen der MEMS Technologie .....</b>	<b>16</b>
3.1 Chemische Gasphasenabscheidung .....	16
3.1.1 Thermische CVD und Plasma-unterstützte CVD .....	16
3.1.2 Eine kurze Einführung in die Plasmaphysik .....	19
3.1.3 PECVD Kammer und Gas-Verweilzeit in der Kammer .....	23
3.1.4 Einfluss der Plasma-Parameter auf die Eigenschaften der abgeschiedenen Schichten .....	26
3.2 Mechanische Grundlagen .....	29
3.2.1 Mechanische Spannung und Verformung .....	30
3.2.2 Hookesches Gesetz, Elastizitätsmodul und Poissonzahl .....	35
3.2.3 Mechanische Spannungen in Dünnschichten .....	38
3.2.4 Messung der mechanischen Spannung in Dünnschichten .....	40
3.2.5 Membrandurchbiegung der kapazitiven Drucksensoren .....	44
3.2.6 Charakterisierung der Membrandurchbiegung mit numerischen Methoden .....	47
<b>4 Vergleich der verschiedenen Integrationskonzepte eines Post-CMOS-Drucksensors .....</b>	<b>50</b>

<b>5 PECVD-Abscheidung von SiGe- und Ge-Schichten.....</b>	<b>53</b>
5.1 PECVD-Abscheidung von bor-dotierten SiGe-Schichten mit erhöhten gesamten Gasflussraten .....	54
5.1.1 Einfluss der gesamten Gasflussrate auf die Ge-Konzentration der SiGe Schicht.....	58
5.1.2 Einfluss der gesamten Gasflussrate auf die mechanische Spannung der SiGe Schicht .....	58
5.1.3 Einfluss der gesamten Gasflussrate auf die Abscheidungsrate der SiGe Schicht.....	59
5.2 Erklärung für die durch erhöhten gesamten Gasfluss verursachte Kristallinität .....	60
5.2.1 Mechanismen für die durch erhöhten gesamten Gasfluss verursachte Kristallinität.....	60
5.2.2 Bedeutung des Phänomens der durch erhöhten gesamten Gasfluss verursachten Kristallinität.....	68
5.3 PECVD Abscheidung von phosphor-dotierten SiGe-Schichten.....	68
5.3.1 PECVD Abscheidung von phosphor-dotierten SiGe Schichten mit erhöhter gesamter Gasflussrate .....	68
5.3.2 PECVD Abscheidung von phosphor-dotierten SiGe Schichten mit verschiedenen Ar-Verdünnungen .....	70
5.4 PECVD Abscheidung von bor-dotierten SiGe-Schichten bei verschiedenen Substrat-Temperaturen .....	74
5.5 PECVD Abscheidung von bor-dotierten Ge Schichten bei verschiedenen Substrat-Temperaturen .....	77
5.6 PECVD Abscheidung von bor-dotierten SiGe Schichten mit verschiedenen GeH <sub>4</sub> zu SiH <sub>4</sub> Verhältnissen .....	79
5.7 PECVD Abscheidung von bor-dotierten SiGe Schichten mit verschiedenen elektrischen Leistungen .....	80
5.8 Zusammenfassung .....	83
<b>6 Materialien und Strukturen für die Integrationskonzepte .....</b>	<b>85</b>
6.1 Materialien für die offene Membran.....	85
6.1.1 Effekt der Spannung der Druckdosenmembran auf die Form der Membran .....	86

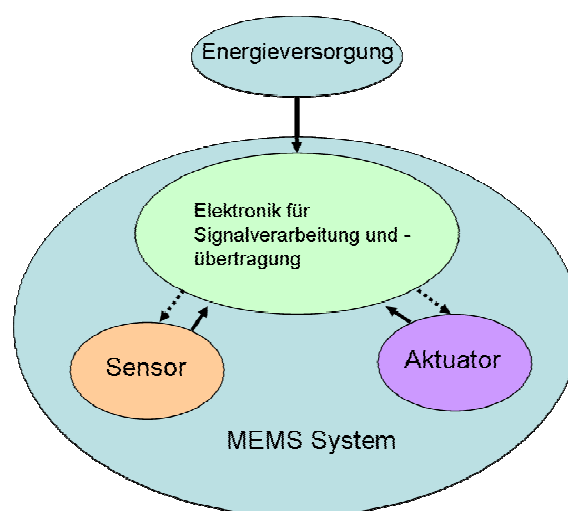
6.1.2	Materialien für die offene Membran der SiGe- und Ge-Druckdose	87
6.1.2.1	Abscheidung und Eigenschaften der Materialien für die offene Membran der SiGe und Ge Druckdose.....	87
6.1.2.2	Haftungstests von SiGe-A und SiGe-B auf Siliziumnitrid.....	93
6.1.3	Materialien für die offene Membran der a-Si Druckdose .....	94
6.1.3.1	Abscheidung und Eigenschaften der Materialien für die offene Membran der a-Si Druckdose .....	95
6.1.3.2	Haftungstests von a-Si-A auf Siliziumnitrid.....	97
6.2	Materialien für die Verschlusschicht .....	98
6.2.1	Materialien der Verschlusschicht der SiGe- und Ge-Druckdose	98
6.2.1.1	Versuch mit der Verschlusschicht aus dem PECVD Material	99
6.2.1.2	Eingesetzte CVD Verschlusschicht der SiGe- und Ge-Druckdose .....	102
6.2.2	Materialien der Verschlusschicht der a-Si-Druckdose .....	104
6.3	Herstellung und Untersuchung der SiGe- und Ge-Durchkontaktierung auf der unterliegenden Metall-Ebene .....	106
6.4	Zusammenfassung .....	114
<b>7</b>	<b>Herstellung der Druckdose mit Oberflächen-Mikromechanik-Verfahren</b>	<b>116</b>
7.1	Herstellung der Druckdosen mit SiGe- und Ge-Membran.....	116
7.1.1	Der eingesetzte oberflächenmikromechanische kapazitive-Druckdosen-Prozess .....	116
7.1.2	Die von der Verschlusschicht verursachte Durchbiegungsveränderung.....	118
7.1.3	Innendruck-Charakterisierung der verschlossenen Druckdose .	123
7.1.4	Charakterisierung der Druckabhängigkeit der Druckdosen mit SiGe- und Ge-Membran .....	126
7.2	Herstellung der Druckdosen mit a-Si-Membran .....	131
7.2.1	Herstellung der Druckdosen mit a-Si Membranen.....	131
7.2.2	Probleme beim a-Si Konzept.....	134
7.3	Zusammenfassung und Vergleich .....	135

<b>8</b>	<b>Versuche für Druckdose mit Plasma-aktiviertem Waferbonden.....</b>	<b>136</b>
8.1	Herstellung der Teststruktur der Druckdose mit PAWB .....	136
8.2	Charakterisieren der mit PAWB hergestellten Druckdose .....	139
8.3	Zusammenfassung .....	141
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>142</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>147</b>



## 1 Der aktuelle Stand der Drucksensor-Technologien

Mit der steigenden Nachfrage nach intelligenten, multifunktionalen und kostengünstigen industriellen Produkten wurde die Miniaturisierung von elektronischen und mechanischen Komponenten zu immer kleineren Dimensionen getrieben. Am Ende der 1980er Jahre wurde der Begriff *Microelectromechanical systems* (MEMS) in den USA zum ersten Mal für Systeme verwendet, die aus Bauteilen von einer Größe im Mikrometer-Bereich bestehen, und elektronische und/oder mechanische Funktionen leisten. Die Begriffe Mikrosystem in Europa und Mikromaschine (*micromachine*) in Japan sind äquivalent zu dem Begriff MEMS.



**Abbildung 1.1:** Eine schematische Darstellung eines typischen MEMS Systems.

Ein typisches MEMS System umfasst einen Sensor, der die äußeren Informationen aufnimmt, die Elektronik für die Signalverarbeitung und –übertragung, und einen Aktuator, der auf die von der Elektronik verarbeiteten Signale reagiert und entsprechende Anregungen erzeugt. Eine schematische Darstellung [1] für ein typisches MEMS wird in Abbildung 1.1 gezeigt. Ein Sensor oder Aktuator mit der dazugehörigen Elektronik ist alleine auch ein MEMS. In der Tat ist die erfolgreichste Kommerzialisierung von MEMS im Geschäftsfeld der Drucksensoren und Inertialsensoren erfolgt.

MEMS Drucksensoren werden an vielen Stellen in unserem alltäglichen Leben, in der industriellen Produktion und in verschiedenen speziellen Bereichen verwendet. Alleine in einem Auto werden dutzende von Drucksensoren eingesetzt, zum Beispiel für die Überwachung des Drucks im Ansaugtrakt des Motors, oder des Reifendrucks, oder auch im Abgas-Rezirkulationssystem. Einen anderen großen Markt für MEMS Drucksensoren gibt es für Blutdrucksensoren. Auch an anderen Stellen kann man Verwendungsbeispiele von Drucksensor finden, zum Beispiel in

der industriellen Prozesssteuerung, in der Luft- und Raumfahrt, in Tauchausrüstungen und so weiter.

In der aktuellen Druckmessungstechnik wird hauptsächlich die Verformung von speziell entworfenen Sensorelementen detektiert, die von dem zum messenden Druck belastet wird. Die detektierte Verformung wird mit bestimmten Mechanismen in elektrische Signale umgewandelt, die nachher von der Elektronik verarbeitet und zum Benutzer versendet werden.

Die Sensorelemente sind sehr oft Membranen. Die Verformung der Membran wird kapazitiv, piezoresistiv oder mit Hilfe der Verschiebung der Resonanzfrequenz eines Resonators charakterisiert. Das heißt, dass es drei Hauptprinzipien gibt, um die Verformung der Membran in elektrische Signale umzuwandeln, nämlich das kapazitive, piezoresistive und das resonante Prinzip.

### 1.1 Kapazitiver Drucksensor

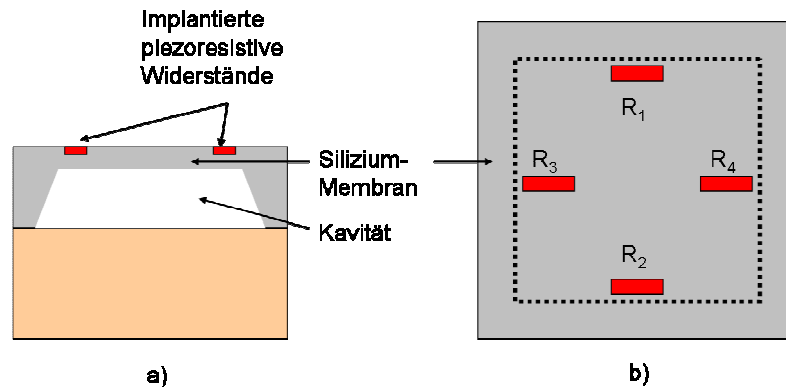
Beim kapazitiven Prinzip wird eine ablenkbare Membran dem zu messenden Druck ausgesetzt. Die Biegung der Membran verursacht eine Änderung des Abstandes zwischen der Membran und einer feststehenden Elektrode, und dadurch wird die Kapazität dazwischen variiert. Die Abhängigkeit zwischen dem Druck und der Kapazitätsänderung wird zum Messen des Drucks genutzt. Typischerweise wird die Kapazität zwischen der Membran und der feststehenden Elektrode mit einem Oszillator integriert, und die von der Kapazitätsänderung hervorgerufene Frequenzverschiebung des Oszillators wird für die Charakterisierung des Drucks genutzt.

Die Herstellung des Sensorelements für den kapazitiven Drucksensor basiert hauptsächlich auf drei Kategorien von Prozessen: die Kombination von Bulk-Mikromechanik und Wafer-Bonden [2], Oberflächen-Mikromechanik [3], Strukturierung von SOI (*silicon on insulator*) Wafern [4]. Typische Materialien der Membran sind einkristallines Silizium, polykristallines Silizium, Quarz und Siliziumcarbid [5]. Um die Linearität des Ausgangssignals zu verbessern werden verschiedene Maßnahmen ergriffen, zum Beispiel die Verwendung einer Membran mit einer zentralen Verstärkung [6] oder die Verwendung von ringförmigen Elektroden [7].

Da diese Arbeit sich hauptsächlich auf den kapazitiven Drucksensor konzentriert, wird in den folgenden Kapiteln hauptsächlich und intensiv dieser kapazitive Drucksensor diskutiert. Die Alternativen sollen kurz an dieser Stelle vorgestellt werden.

## 1.2 piezoresistiver Drucksensor

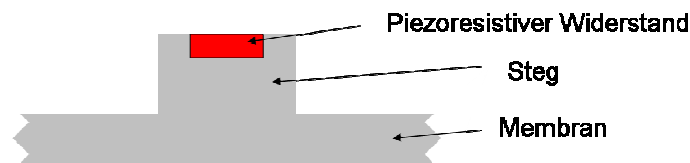
Der piezoresistive Sensor basiert auf dem piezoresistiven Effekt, der das Phänomen beschreibt, dass der elektrische Widerstand eines Materials sich unter Belastung mit einer mechanischen Spannung ändert. Dieser Effekt wird durch zwei Tatsachen hervorgerufen, die geometrische Verformung des Materials, und die Veränderung des spezifischen Widerstandes des Materials durch die mechanische Spannung. Während die Wirkung der geometrischen Verformung hauptsächlich zu dem piezoresistiven Effekt von Metallen beiträgt, dominiert die Wirkung der Änderung des spezifischen Widerstandes beim piezoresistiven Effekt von Halbleitern. Da Halbleiter einen viel deutlicheren piezoresistiven Effekt als Metalle besitzen, werden für die piezoresistiven MEMS-Drucksensoren vor allem Halbleitermaterialien, wie einkristallines oder polykristallines Silizium, eingesetzt.



**Abbildung 1.2:** Typisches Layout der piezoresistiven Widerständen auf einer quadratischen Membran. a) Querschnitt; b) Aufsicht.

Typischerweise werden auf einer quadratischen Membran (z.B. aus Silizium) piezoresistive Widerstände mit Hilfe von Diffusion oder Implantation oder durch Schichtabscheidung und Strukturierung erzeugt. Wenn die Membran dem zu messenden Druck ausgesetzt wird, biegt sie sich durch. Durch die dadurch entstehende mechanische Spannung wird eine Änderung der Widerstände bedingt, die zur Charakterisierung des Drucks benutzt wird. In Abbildung 1.2 wird ein typisches Layout von piezoresistiven Widerständen auf einer quadratischen Membran dargestellt. Die 4 rechteckigen piezoresistiven Widerstände  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$  sind parallel zu einander angeordnet. Sie werden in der Nähe von Membran-Kanten platziert, so dass  $R_1$  und  $R_2$  bei der Durchbiegung der Membran eine Widerstandsänderung mit derselben Größe, allerdings den umgekehrten Vorzeichen, im Vergleich mit  $R_3$  und  $R_4$ , verursachen. Diese piezoresistiven Widerstände werden typischerweise in einer Wheatstoneschen Messbrücke zusammengefasst, somit kann eine gute Empfindlichkeit des Sensorelementes gewährleistet werden [8].

Stege auf Membranen wurden verwendet, um die Druckempfindlichkeit des Sensorelementes zu erhöhen [9]. In diesem Fall wurden Stege auf einer Membran angelegt, und piezoresistive Widerstände wurden in dem obersten Teil der Stege erzeugt. Somit sind die piezoresistiven Widerstände weiter von der neutralen Ebene der Membran entfernt, und infolgedessen wird die Empfindlichkeit der piezoresistiven Widerstände gegen die Membran-Verformung verstärkt. In Abbildung 1.3 wird ein schematischer Querschnitt von einem Teil einer Membran mit Stegen dargestellt.



**Abbildung 1.3:** Schematischer Querschnitt eines Teils von einer Membran mit Stegen.

In der Vergangenheit wurden für die Herstellung der Membran und der unterliegenden Kavität hauptsächlich chemische anisotrope Ätzverfahren verwendet. Typischerweise wurde Kaliumhydroxid (KOH) zur bulk-mechanischen Strukturierung der Membran eingesetzt. Obwohl die so hergestellte Membran angesichts der Dicke und Größe der Membran wohl definiert ist, bedingt die  $54,7^\circ$  Seitenwandneigung (erzeugt bei KOH Ätzen) einen großen Oberflächenbedarf auf dem Sensorchip. Dank der Kommerzialisierung des reaktiven Ionentieftätzens (englisches Wort: *deep reactive ion etching*, DRIE) seit den 90er Jahren kann man jetzt bei der Herstellung der Membran und Kavität diese neue Technologie verwenden, und den Oberflächenbedarf der Sensorelemente auf dem Sensorchip minimieren.

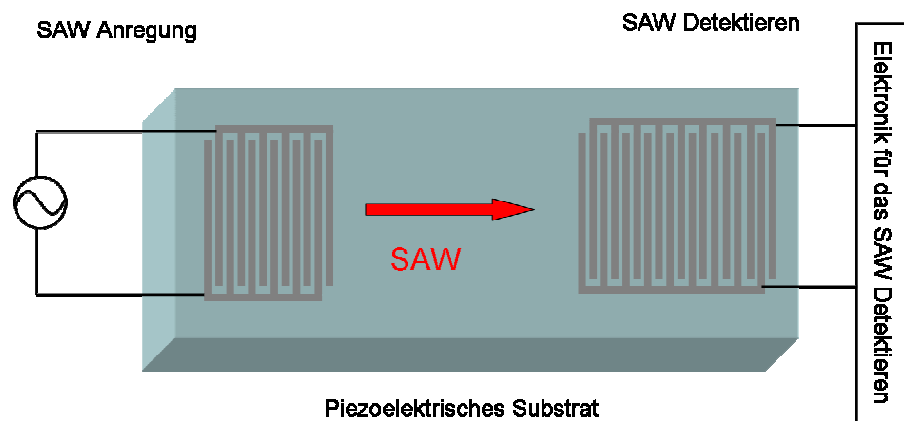
Da ein p-n-Übergang nur eine Temperatur von höchstens etwa  $120^\circ\text{C}$  ohne größere Änderungen der Eigenschaften aushalten kann, eignen sich die implantierten piezoresistiven Widerstände nicht für Hochtemperatur-Anwendungen. Man kann die piezoresistive Widerstände aus polykristallinem Silizium auf der Membran anlegen, und damit die Hochtemperatur-Beständigkeit verbessern. Allerdings ist der piezoresistive Effekt des Poly-Siliziums nicht so stark wie der von einkristallinem Silizium. Piezoresistive Widerstände können auch aus der oberen Siliziumschicht eines SOI Wafers hergestellt werden, dabei können die Widerstände wie einzelne Inseln auf der Oxid-Schicht angelegt werden, oder sie können auch durch mit Oxid gefüllte Gräben gegen den Rest der Silizium-Schicht isoliert werden [10].

### 1.3 resonante und andere Drucksensoren

Obwohl die Herstellung von resonanten Drucksensoren deutlich aufwändiger ist, finden diese Sensoren wegen ihrer guten Auflösung und Genauigkeit verschiedene Anwendungen. Beim resonanten Drucksensor wird ein speziell entworfener Resonator mit dem den Druck detektierenden Element verbunden. Wenn der zu mes-

sende Druck an dem Sensorelement (normalerweise eine Membran) anliegt, erzeugt die Verformung des Elements eine Verformung des Resonators. Diese Verformung vergrößert die Steifigkeit des Resonators und damit erhöht die Resonanzfrequenz des Resonators. Somit wird die Resonanzfrequenz des Resonators eine Funktion des zu messenden Drucks.

Aktuelle resonante Drucksensoren basieren auch auf Silizium-Technologien. Weil die Strukturen der Resonatoren recht kompliziert sind, ist ihre Herstellung eine gewisse Herausforderung. Verschiedene Prozesse werden eingesetzt, um Resonatoren herzustellen, wie z.B. selektives Ätzen mit Bor-Dotierung [11], Wafer Bonden [12], oberflächen-mikromechanische Fertigungsverfahren [13], und SOI Technologien [14]. Die Resonatoren von resonanten Drucksensoren wurden auch häufig mit Quarz hergestellt, da Quarz piezoelektrisch ist, was die Anregung und Auslesung des Resonators erleichtert. Allerdings gibt es nicht so viele Verarbeitungstechnologien für Quarz, und die Verarbeitung von Quarz ist auch nicht kompatibel mit der Integration des Sensorelements mit den integrierten Schaltungen.



**Abbildung 1.4:** Schematische Darstellung einer typischen Gestaltung für den SAW-detektierenden Mechanismus bei Druckmessung.

Außerhalb der 3 grundsätzlichen Prinzipien für das Detektieren von Druck werden auch andere Messprinzipien für Druckmessungen verwendet. So können optische Wellenleiter auf einer Membran platziert werden, bei der Druck-induzierten Durchbiegung der Membran wird die Phasen-Verschiebung des durch die optischen Wellenleiter geleiteten Lichtes detektiert und damit auf den Druck geschlossen werden [15].

Sensorelemente basierend auf der Technologie der akustischen Oberflächenwellen (englisches Wort: *surface acoustic wave*, SAW) werden auch in Drucksensoren verwendet [16]. In Abbildung 1.4 wird eine schematische Darstellung der typischen Gestaltung eines SAW-Sensorelements gezeigt. Die SAW werden an einem Ende eines piezoelektrischen Substrates erzeugt, entlang des piezoelektrischen

Substrats geleitet und am anderen Ende des Substrates detektiert. Eine Druck-induzierte Verformung des piezoelektrischen Substrates bedingt eine Verschiebung der Oberflächenwellengeschwindigkeit und der Frequenz der Oberflächenwelle. Somit wird die Abhängigkeit der Veränderung der Oberflächenwelle durch den ausgeübten Druck zum Messen des Drucks verwendet.

In letzter Zeit wurde außerdem versucht, mit Kohlenstoffnanoröhren [17] oder Zinkoxid-Nanodraht [18] einen Drucksensor zu realisieren. Kohlenstoffnanoröhren werden dazu auf einer Membran geheftet, und damit ein piezoresistive Drucksensor mit einem starken piezoresistiven Effekt hergestellt. Die Gruppe von Z. L. Wang hat den piezoelektrischen Effekt von Zinkoxid-Nanodraht untersucht [18]. Obwohl ein kompletter Drucksensor mit Zinkoxid-Nanodrähten noch nicht produziert wurde, ist die hervorragende Sensitivität des Zinkoxid Nanodrahtes gegenüber einer ausgeübten Verformung des Drahtes für die Realisierung eines extrem empfindlichen Drucksensors sehr attraktiv.

## 2 Motivation: Warum die Post-CMOS Integration des kapazitiven Drucksensors?

In diesem Kapitel werden zuerst die verschiedenen Drucksensor-Konzepte verglichen. Danach werden die verschiedenen Integrationsmethodiken für die Integration eines kapazitiven Drucksensors mit der CMOS-Schaltung diskutiert. Zum Ende werden die Motive für die Post-CMOS-Integration eines kapazitiven Drucksensors zusammengefasst.

### 2.1 Vergleich der verschiedenen Drucksensor-Konzepte

Die Kombination von Transpondern und MEMS-Sensoren gibt uns in den letzten Jahren eine breite und attraktive Aussicht unseres zukünftigen Lebens. Die Entwicklungen von dem drahtlosen Sensornetz (englisches Wort: *wireless sensor network*, WSN) und Internet der Dinge (englisches Wort: *Internet of things*) können unser zukünftiges Leben drastisch erleichtern und den Schutz unserer Umwelt besser optimieren. In diesen Entwicklungen werden drahtlose Netzwerke mit zahlreichen Sensorknoten gebildet. Diese Sensorknoten können innerhalb des Netzwerks untereinander kommunizieren, die von Menschen gesendeten Befehle durchführen, die von Menschen geforderten Informationen liefern, oder Aufgaben kooperativ automatisch erledigen. Weil die Sensorknoten drahtlose Geräte sind, werden sie mit Batterien oder Solarzellen betrieben, oder mit RFID Technologie (*Radio-frequency identification*) passiv versorgt. Deswegen sollen die Sensortransponder möglichst wenig Leistung verbrauchen. Die drahtlosen Sensoren werden schon kommerziell in vielen Feldern verwendet, wie bei medizinischen Implantaten, bei der Reifendruck-Überwachung in PKWs, bei Überwachung und Kontrolle der industriellen Prozesse und Maschinen, bei der Hausautomation. Überall wenn drahtlose Sensoren benötigt werden, soll der Leistungsverbrauch der in Frage kommenden Sensoren möglichst niedrig sein.

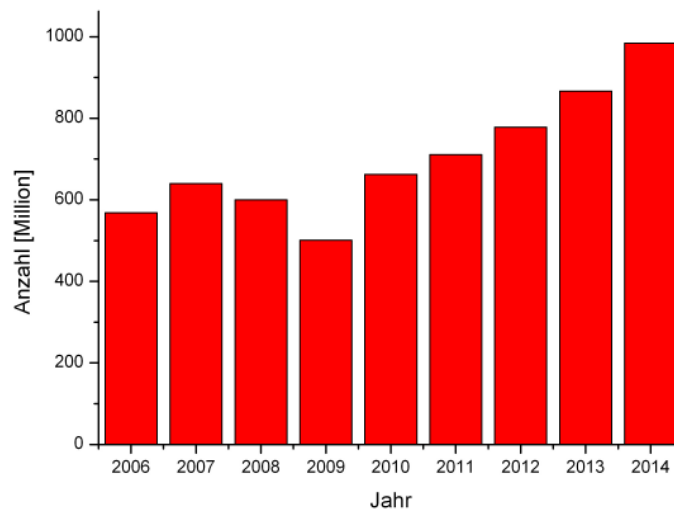
Unter den drei Hauptprinzipien der Druckmessungstechnologie, der kapazitiven, piezoresistiven, und resonanten Druckmessung, hat das kapazitive Messprinzip den wenigsten Leistungsverbrauch. Während der typische Leistungsverbrauch des piezoresistiven und resonanten Messprinzips entsprechend circa 10mW und 0,1 bis circa 10mW sind, liegt der Leistungsverbrauch bei dem kapazitiven Prinzip unter 0,1mW [19]. Wegen des kleinen Leistungsverbrauchs passt das kapazitive Messprinzip sehr gut zu der drahtlosen Druckmessung.

Das kapazitive Messprinzip ist nicht so temperaturempfindlich wie das piezoresistive und resonante Prinzip. Außerdem kann man die Temperaturempfindlichkeit eines kapazitiven Drucksensors relativ einfach durch die Einrichtung von Referenz-Sensorelementen minimieren. Dieser Vorteil vereinfacht das Design von kapazitiven Drucksensoren, während komplizierte Temperatur-

Kompensationsmechanismen beim piezoresistiven und resonanten Drucksensor integriert werden müssen. In Tabelle 2.1 werden die Eigenschaften der drei Messungsmechanismen angesichts Leistungsverbrauch, Temperaturempfindlichkeit, Genauigkeit und Auflösung zusammengefasst [19].

**Tabelle 2.1:** Vergleich der Eigenschaften der 3 Messungsprinzipien der MEMS Sensoren

<i>Eigenschaft</i>	<i>piezoresistiv</i>	<i>resonant</i>	<i>kapazitiv</i>
Leistungsverbrauch [mW]	circa 10	0,1 bis 10	< 0,1
Temperaturempfindlichkeit	$-1.600 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	$-30 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	$4 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
Auflösung [ppb]	10.000	10	10.000 bis 100.000
Genauigkeit [ppm]	500 bis 10.000	100 bis 1000	100 bis 10.000



**Abbildung 2.1:** Ausblick nach der weltweiten Lieferung von MEMS-Sensoren in der Fahrzeugindustrie [20].

Obwohl das kapazitive Messprinzip den wenigsten Leistungsverbrauch und die kleinsten Temperaturempfindlichkeit hat, liegt die Auflösung vom kapazitiven Prinzip auf dem 3. Platz. Die Auflösung vom piezoresistiven und resonanten Messungsprinzip ist besser als die des kapazitiven Prinzips. Insbesondere besitzt das resonante Prinzip die besten Auflösung und Genauigkeit. Wenn eine extreme Anforderung an Auflösung und Genauigkeit erfüllt werden muss, ist das resonante



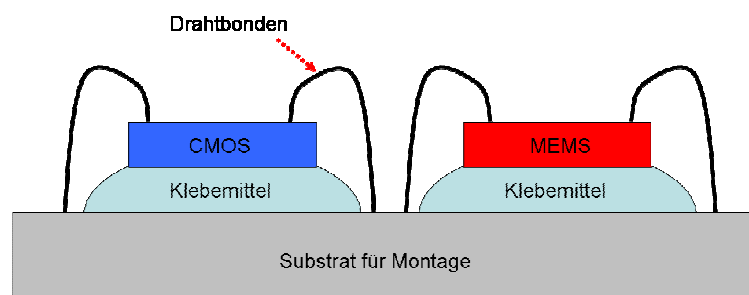
Prinzip nicht verzichtbar, obwohl die Herstellung eines resonanten Sensors viel komplizierter ist.

Der passive drahtlose Drucksensor mit SAW-Technologie wurde auch realisiert. Allerdings wird für das piezoelektrische Substrat normalerweise Quarz verwendet, der nicht gut zu der auf Silizium basierenden IC (*integrated circuit*) Technologie passt. Das bedeutet, dass mit der SAW-Technologie ein extrem winziger Drucksensor schwer zu realisieren ist. Wegen seines niedrigen Leistungsverbrauchs und seiner kleinsten Temperaturempfindlichkeit ist das kapazitive Messprinzip bei den meisten Anwendungen die beste Variante für einen drahtlosen Drucksensor.

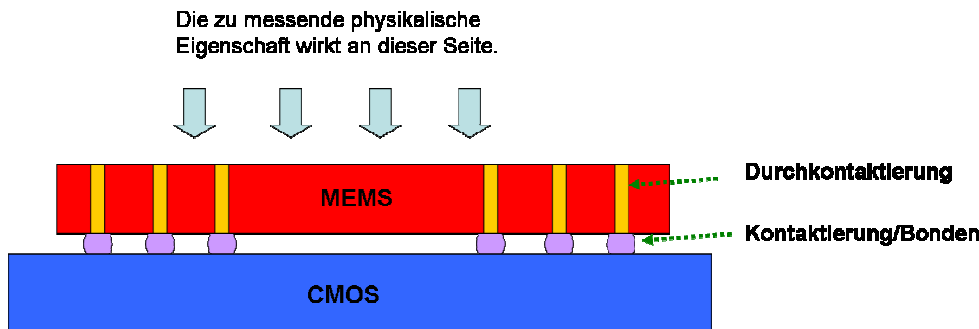
### 2.2 Motivation: Warum Post-CMOS Integration?

In letzten Jahren vergrößerte sich der MEMS-Markt weltweit trotz der wirtschaftlichen Rezession im Jahr 2009. Im Bereich der Fahrzeugindustrie wurden im Jahr 2010 auf der ganzen Welt 662.3 Millionen MEMS-Sensoren geliefert. Diese Zahl überschreitet die des Vor-Krise Höhepunktes im Jahr 2007 von 640 Millionen [20]. In Abbildung 2.1 wird eine Vorhersage über der weltweiten Lieferung von MEMS-Sensoren in der Fahrzeugindustrie dargestellt. Dabei wird ein stetiger Anstieg bis 2014 erwartet. Eine andere Vorhersage besagt, dass die durchschnittliche Anzahl der in einem Fahrzeug verwendeten MEMS Bauteile von 40 bis 60 bei 2011 steigen kann [21]. Um eine Vergrößerung und eine Verteuerung der Fahrzeuge zu vermeiden, müssen die MEMS-Sensoren verkleinert und ihre Kosten reduziert werden.

Allgemein gesprochen, bedeutet die Verkleinerung des MEMS Sensors mehr Funktionalitäten in einem Gerät mit einem bestimmten Volumen oder sogar in einem verkleinerten Gerät, was die von der modernen Technik immer angestrebten Ziele sind. Die Verkleinerung des MEMS Sensors wird hauptsächlich entlang zweier Richtungen realisiert: durch Skalierung der CMOS (*Complementary metal-oxide-semiconductor*) Schaltungen und durch die Optimierung der Integration von CMOS und MEMS. Da ersteres nicht im Fokus dieser Dissertation liegt, wird hier nur die Optimierung der Integration von CMOS und MEMS diskutiert.



**Abbildung 2.2:** CMOS-MEMS Integration basierend auf einem Substrat für die Montage.

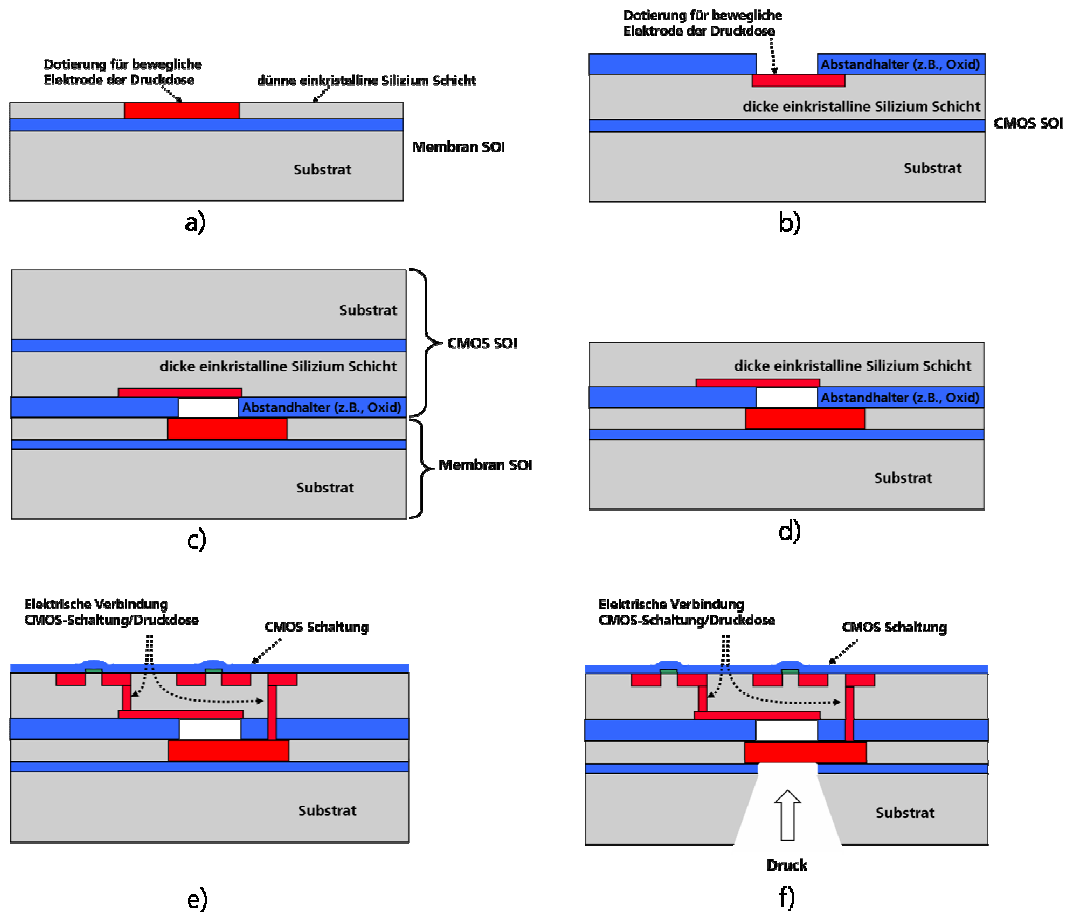


**Abbildung 2.3:** Schematische Darstellung einer typischen 3D Integration von CMOS und MEMS mit TSV und Waferbonden.

Die Integration von CMOS und MEMS kann durch zwei Mechanismen durchgeführt werden: Durch Integration basierend auf zwei Chips (CMOS-Chip und MEMS-Chip) und durch einen monolithische Ansatz. Der meistens verwendete Zwei-Chip-Mechanismus ist der auf Montage-Substraten basierende Ansatz (englisches Wort: *package-based integration*) [22]. In Abbildung 2.2 wird die Integration basierend auf dem Substrat für Montage schematisch dargestellt. Bei diesem Konzept werden der CMOS-Chip und der MEMS-Chip mittels elektrischer Leitungen mit dem Montage-Substrat verbunden. Dieses Konzept ermöglicht die unabhängige Optimierung von CMOS- und MEMS-Chip, verkürzt die Zeit von der Forschung zum Markteintritt, und spart viele Forschungskosten im Vergleich mit den anderen Konzepten. Allerdings bringen die langen elektrischen Leitungen zwischen den CMOS- und MEMS-Chips starke parasitäre Effekte hervor und damit reduziert sich die Leistung des Systems.

Es gibt auch ein anderes auf einem Montage-Substrat basierendes Konzept, die Wende-Montage (englisches Wort: *flip chip*) Technik. Jedoch gehört es immer noch zu den 2D Integrationen, und somit kann dabei keine signifikante Verkleinerung des Systems erwartet werden. Außerdem hat dieses Konzept auch Nachteile wie schlechte Montage-Ausbeute, die Empfindlichkeit hinsichtlich der thermischen mechanischen Spannung, und die Beeinträchtigung der MEMS-Struktur durch das Klebemittel [23] [24] [25]. Die neuen Entwicklungen im Bereich der Silizium-Durchkontaktierung (englisches Wort: *through-silicon via*, TSV) und Waferbonden ermöglicht ein neues Zwei-Chip Konzept, die 3D Integration. In Abbildung 2.3 wird eine typische 3D Integration von CMOS und MEMS mit TSV und Waferbonden schematisch dargestellt. Dieses Konzept reduziert deutlich die Dimensionen des Systems, denn MEMS und CMOS können über einander platziert werden. Außerdem verringern die verkürzten elektrischen Leitungen (im Vergleich mit dem auf Montage-Substrat basierenden Konzept) auch die parasitären Effekte. Allerdings bedrohen die mechanischen Spannungen aus dem komplizierten Materialien-Stapel die Langzeitstabilität des Systems. Darüber hinaus sind die elektrischen Leitungen zwischen dem CMOS- und MEMS-Teil immer noch zu

lang für manche Anwendungen, wie bei der kapazitiven Druckmessung, die empfindlich hinsichtlich der parasitären Effekte ist.



**Abbildung 2.4:** Prozessablauf des in dieser Arbeit entworfenen Vor-CMOS-Konzeptes. a) der Membran SOI Wafer; b) der CMOS SOI Wafer; c) das Bonden der beiden Wafer mit plasma-aktiviertem Waferbonden; d) Entfernung des Substrates und des eingebetteten Oxides des CMOS SOI Wafers; e) Herstellung der CMOS Schaltung und der elektrischen Verbindungen zwischen CMOS Schaltung und der Druckdose; f) Ätzen des Substrates und des eingebetteten Oxides des Membran SOI Wafers, um die Membran der Druckdose zu öffnen.

Beim kapazitiven Drucksensor soll das Sensorelement möglichst nah an der elektronischen Schaltung platziert werden. Dazu ist der monolithische Ansatz die geeignet Variante für die Integration von CMOS und dem Sensorelement. Es gibt drei Methoden, CMOS und MEMS monolithisch zu integrieren:

1. Vor-CMOS-Methode: Es wird das MEMS zuerst auf dem Wafer prozessiert, und danach die CMOS-Schaltung. Normalerweise wird das MEMS-System neben der CMOS-Schaltung platziert. In der vorliegenden Promotionsarbeit wird auch eine Variante mit dem unter CMOS liegenden MEMS vorgeschlagen.

2. Das Prozessieren von CMOS und MEMS werden miteinander vermischt.
3. Post-CMOS-Methode: Es wird die CMOS-Schaltung zuerst prozessiert, und danach das MEMS. Die MEMS befindet sich dabei typischerweise über der CMOS Schaltung [26].

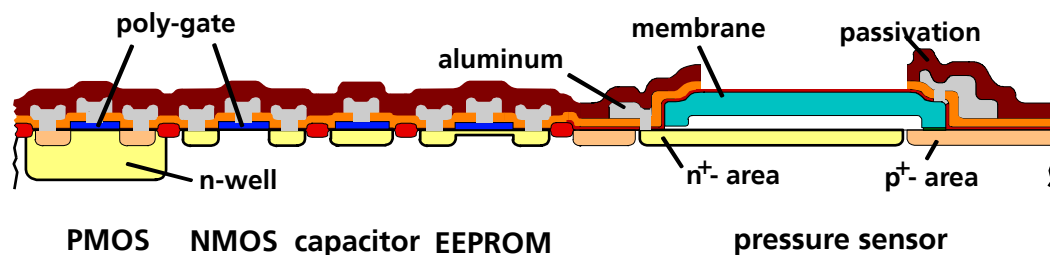
In einer Studie während dieser Arbeit wurde die Vor-CMOS-Methode untersucht. Ein Konzept wird weiter unten vorgestellt. Der Schwerpunkt der Arbeit ist dann aber die Post-CMOS-Methode.

Der Hauptvorteil der Vor-CMOS Methode ist, dass die Fertigung von MEMS nicht von dem thermischen Budget beschränkt, die von der fertigen CMOS Schaltung wie bei den anderen zwei Methoden gefordert wird. Diese Methode wird auch kommerziell eingesetzt [27]. Allerdings ist die dort beschriebene Methode nicht geeignet für die Integration des kapazitiven Drucksensors. Das geschlossene Vakuum und die dünnen Membranen der kapazitiven Drucksensoren können während des Prozessierens der CMOS Schaltung zerstörte Membranen verursachen, und damit die Ausbeute verringern und Partikeln erzeugen.

In dieser Arbeit wurde ein spezielles, integrationsfähiges Vor-CMOS-Konzept entworfen. Bei diesem Konzept wird die dünne Membran der Druckdose während der Prozessierung der CMOS-Schaltungen durch ein dickes Substrat geschützt. Somit kann vermieden werden, dass die Membran der Druckdose während der Bearbeitung der CMOS Schaltungen beschädigt wird. Ein anderer Vorteil des Konzeptes besteht darin, dass die Druckdosen unter den CMOS-Schaltungen platziert werden, wodurch Platz gespart und die Integrationsdichte vergrößert werden kann.

Abbildung 2.4 zeigt den Ablauf des Konzeptes. Das Konzept basiert auf dem Waferbonden von zwei SOI (*silicon on insulator*) Wafer. Einer ist ein SOI-Wafer mit relativ dünner (z.B.,  $1\mu\text{m}$ ) einkristalliner Siliziumschicht (aktive Schicht) auf eingebettetem Oxid (Abbildung 2.4 a)), der hier als Membran-SOI bezeichnet wird, da die dünne Siliziumschicht als die Membran der Druckdose dient. Der andere Wafer ist ein SOI-Wafer mit relativ dicker (z.B.  $5\mu\text{m}$ ) einkristalliner Siliziumschicht (aktive Schicht) auf dem eingebetteten Oxid. Dieser SOI-Wafer wird hier als CMOS-SOI bezeichnet (Abbildung 2.4 b)), da CMOS-Schaltungen auf diesem Wafer hergestellt werden sollen. Die beiden Wafer werden gebondet, wie in Abbildung 2.4 c) gezeigt. Danach wird das Substrat und das eingebettete Oxid von CMOS-SOI entfernt (Abbildung 2.4 d)). Anschließend werden CMOS Schaltungen und die elektrischen Verbindungen zwischen den Schaltungen und den Druckdosen in der aktiven Schicht von CMOS-SOI hergestellt. Zum Schluss wird eine Öffnung im Substrat von Membran-SOI erzeugt, die den zu messenden Druck zur Membran leitet.

Das Konzept hat die Vorteile von hoher Integrationsdichte und fast spannungsfreier einkristalliner Membran. Allerdings ist der Entwicklungsaufwand zu hoch, da völlig neue Technologien, wie die elektrische Kontaktierung zwischen Schaltung und der unten liegenden Druckdose, entwickelt werden müssen. Außerdem können sich in den tiefen Löchern im Substrat von „Membran SOI“ viele Partikel ansammeln und so die Funktionalität der Druckdosen beeinträchtigen. Aufgrund dieser beiden unvermeidbaren Nachteile wurde das Vor-CMOS Konzept in dieser Arbeit nicht ausgeführt.



**Abbildung 2.5:** Querschnitt eines mit der vermischten Methodik monolithischen integrierten kapazitiven Drucksensors (direkt aus [28]).

Bei der vermischten Methodik wird normalerweise die MEMS-Prozessierung nach der Abscheidung des ersten Intermetalldielektrikums für den CMOS gestartet. So werden die Beeinträchtigungen der Metall-Leitungen durch Hochtemperaturprozesse der MEMS-Prozessierung vermieden. Solch ein Integrationsprozess wird am Fraunhofer-Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme (Fraunhofer IMS) für die Integration eines kapazitiven Drucksensors mit der CMOS-Schaltung, die mit einer  $1,2\mu\text{m}$  Technologie prozessiert wird, realisiert. In Abbildung 2.5 wird ein Querschnitt dieses monolithisch integrierten kapazitiven Drucksensors [28] gezeigt. Eines der Motive dieser vorliegenden Promotionsarbeit ist die Aufgabe an Fraunhofer IMS, einen kapazitiven Drucksensor mit einer  $0,35\mu\text{m}$  CMOS-Schaltung zu integrieren. Sobald die Dimensionen der CMOS-Schaltung verkleinert werden, können die unerwünschten Diffusionen der implantierten Gebiete der CMOS-Schaltung und folglich die Degradationen der Bauelemente wegen der bei der Herstellung der Druckdosen eingesetzten Hochtemperatur-Prozesse nur durch sehr viele Aufwände vermieden werden. Ein Integrationsverfahren, das bei einer niedrigen CMOS-kompatiblen Temperatur durchgeführt werden kann, muss für die Integration der Druckdose mit der skalierten CMOS-Schaltung entwickelt werden.

Angeichts der durch Hochtemperaturprozesse bedingten Bauelement-Degradationen ist die vermischte Methodik für die Integration von MEMS mit der feinen CMOS Schaltungen der neuen Generation nicht geeignet. Auch für die Integration mit relativ groben CMOS-Schaltungen gibt es noch viele Nachteile. So beeinflussen sich bei dieser Methode die CMOS- und MEMS-Prozesse stark ge-

gegenseitig und die einzelnen Schritte vom CMOS-Prozessablauf müssen wegen des MEMS-Ablaufes angepasst werden. Das führt dazu, dass diese Integration teuer und zeitaufwendig ist. Außerdem wird das MEMS bei dieser Methode immer neben der CMOS-Schaltung platziert. Das heißt, dass die Verkleinerung des ganzen Systems relativ limitiert wird. Bei dem Ätzen der Opfer-Schicht des MEMS muss der CMOS-Bereich mit einer Schicht bedeckt werden, die ihn vor dem Ätzmittel schützt. Das erfordert einen ausreichenden Platz zwischen CMOS und MEMS, was den Platzverbrauch erhöht. Diese Nachteile können durch die Post-CMOS-Methode vermieden werden.

Wenn für MEMS geeignete Materialien, die bei einer CMOS-kompatiblen Temperatur prozessiert werden können, eingesetzt werden können, kann das MEMS nach dem CMOS-Ablauf über der CMOS-Schaltung gefertigt werden (Post-CMOS-Methode). Die maximal erlaubte Temperatur für die MEMS-Prozesse bei der Integration mit einem  $0,35\mu\text{m}$  Standard-CMOS-Prozess mit Aluminium-Leiterbahnen beträgt circa  $520^\circ\text{C}$  für eine Zeitdauer von 90 Minuten [29]. Die Prozessierung von MEMS unter diesem thermischen Budget sollte die Metall-Leitungen, die Transistoren und die Intermetallodielektrika nicht beeinträchtigen. Bei der Post-CMOS Methode können CMOS- und MEMS-Prozess unabhängig optimiert werden. Der MEMS-Prozess beeinflusst nicht den CMOS-Prozessablauf, und diese Integration ist daher zeit- und kostensparend. Außerdem kann die maximale Integrationsdichte mit der Post-CMOS Integration erreicht werden, wenn das MEMS direkt über der CMOS Schaltung platziert werden kann.

### 2.3 Zusammenfassung

Für die meisten drahtlosen Anwendungen, bei denen ein kleiner Leistungsverbrauch notwendig ist, ist das kapazitive Messprinzip vorteilhaft im Vergleich mit dem piezoresistiven und resonanten Prinzip, da das kapazitive Prinzip die minimale Leistung verbraucht. Weil die drahtlosen Anwendungen in den letzten Jahren weitgehend verbreitet werden, werden dabei auch die Drucksensoren mit dem kapazitiven Prinzip bedeutender.

Mit der monolithischen Integration eines Drucksensors mit einer CMOS-Schaltung kann die minimale Größe des ganzen Systems gewährleistet werden. Die vermischte Methodik der monolithischen Integration, bei der CMOS und MEMS Prozesse miteinander gemischt werden, ist für die Integration des Drucksensors mit feiner CMOS-Schaltung nicht geeignet, da die Hochtemperatur-Prozesse für die Herstellung von MEMS die CMOS-Bauelemente beeinträchtigen können. Die Vor-CMOS-Methodik der monolithischen Integration ist nicht für die Integration des kapazitiven Drucksensors geeignet, weil die vorab hergestellte Membran der Druckdose bei den CMOS-Prozessen zerstört werden kann. Außerdem ist die Integrationsdichte bei dieser Methodik klein, denn es wird die Druckdose normalerweise neben der CMOS-Schaltung platziert. Bei der Post-CMOS-

Methodik der monolithischen Integration kann die Druckdose über der CMOS-Schaltung platziert und damit die Integrationsdichte vergrößert werden. Da das CMOS- und das Drucksensor-Modul bei der Post-CMOS-Integration gegeneinander getrennt werden, kann die Optimierung der beiden Module ohne Einflüsse aufeinander durchgeführt werden, wenn das Temperaturbudget für CMOS Schaltung nicht von den MEMS-Prozessen überschritten wird.

Angeichts der oben genannten Vorteile wird die Post-CMOS-Integration eines kapazitiven Drucksensors als das Thema dieser Arbeit diskutiert.

### 3 Einige theoretische Grundlagen der MEMS Technologie

Im ersten Thema in diesem Kapitel geht es um die Schichtabscheidungsverfahren, die in der mikroelektronischen Industrie eingesetzt werden. Dabei werden eine kurze Einführung in die Plasmaphysik und die Diskussionen über den Einfluss der Plasma-Parameter auf die Eigenschaften der abgeschiedenen Schichten vorgestellt. Als das zweite Thema werden die Grundlagen für die Untersuchung der mechanischen Eigenschaften von Dünnschichten und Membranen diskutiert. Dabei werden die grundlegende elastische mechanische Theorie, die mechanische Spannung in Dünnschichten und die Charakterisierung der Membran-Durchbiegung diskutiert.

#### 3.1 Chemische Gasphasenabscheidung

Unter dem Begriff Chemische Gasphasenabscheidung (englisches Wort: *chemical vapour deposition*, Abkürzung: CVD) versteht man eine Methode, Feststoffe aus gasförmigen Ausgangsstoffen (Präkursor) mit Hilfe von zugeführter thermischer und/oder elektromagnetischer Energie abzuscheiden. Die chemische Gasphasenabscheidung ist eine der wichtigsten Abscheidungsmethoden in mikroelektronischer Produktion. Typische Verwendungen sind, zum Beispiel, die Abscheidung von Hartmasken für Ätzprozesse, die Abscheidung von Polysilizium als Gate-Elektrode und Leiterbahn, und die Abscheidung von Passivierungsschichten.

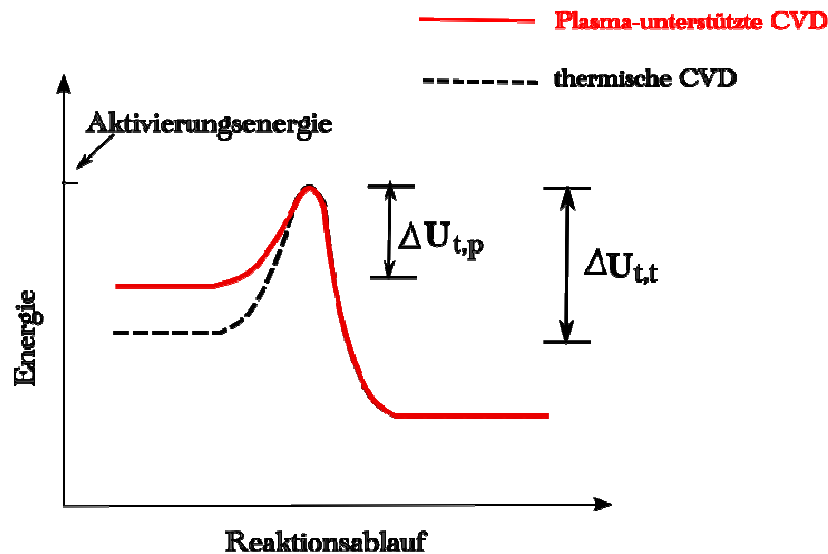
##### 3.1.1 Thermische CVD und Plasma-unterstützte CVD

Die in der mikroelektronischen Industrie eingesetzten CVD-Prozesse können gemäß der Art der den Präkursormolekülen bzw. -atomen zugeführten Energien in thermische CVD und Plasma-unterstützte CVD (PECVD) unterteilt werden. Während bei der thermischen CVD nur die thermische Energie verwendet wird, trägt bei der PECVD auch die elektromagnetische Energie zu den Reaktionen bei.

Bei der thermischen CVD zersetzen sich oder reagieren mit einander die zur Reaktionskammer eingeleiteten Präkursorgase an den Oberflächen der erhitzten Substrate, d.h., dass die Präkursorgase die für die Reaktionen benötigte Aktivierungsenergie in Form von thermischer Energie durch das Substrat erhalten. Bei der Plasma-unterstützten CVD wird die Gasmischung der Präkursorstoffe zuerst durch die von außen zugeführte elektromagnetische Energie in ein Plasma umgesetzt, d.h., die Präkursor Moleküle werden zuerst dissoziiert, ionisiert oder in einen höheren Energie Zustand (z.B. Bildung von metastabilen Zuständen) angeregt. Die in gewissem Maße bereits aktivierten Präkursor Moleküle erhalten dann an den erhitzten Substrat-Oberflächen die für die Reaktionen notwendige volle Aktivierungsenergie, d.h., die Reaktionen kann dann an den Substrat-Oberflächen



ablaufen. In Abbildung 3.1 wird durch eine schematische Darstellung der oben erwähnte Unterschied zwischen der thermischen CVD und der Plasma-unterstützten CVD in Bezug auf die eingesetzte Energienzuführung dargestellt.  $\Delta U_{t,p}$  und  $\Delta U_{t,t}$  repräsentieren jeweils den Beitrag der thermischen Energie zur Aktivierungsenergie bei der Plasma-unterstützten CVD und den bei der thermischen CVD.  $\Delta U_{t,t} - \Delta U_{t,p}$  ist dann der Beitrag der zugeführte elektromagnetischen Energie bei der Plasma-unterstützten CVD.



**Abbildung 3.1:** Schematische Darstellung des Unterschiedes zwischen der thermischen und der Plasma-unterstützten CVD in Bezug auf die zugeführten Energien [30].

Thermische CVD-Prozesse, die in der mikroelektronischen Industrie weit verbreitet sind, sind z.B. die APCVD (*atmospheric pressure CVD*) und die LPCVD (*Low-pressure CVD*). Der PECVD-Prozess (*plasma enhanced CVD*) ist eine typische Plasma-unterstützte CVD, die in der mikroelektronischen Industrie eingesetzt wird. In Tabelle 3.1 werden die Eigenschaften der drei unterschiedlichen chemischen Gasphasenabscheidungsverfahren zusammengefasst.

APCVD ist die erste in mikroelektronischer Industrie eingesetzte chemische Gasphasenabscheidungsmethode zum Zweck der Abscheidung von Oxid und epitaktischen Schichten. Da die Reaktionen unter atmosphärischen Druck stattfinden, kann der Reaktor vergleichsweise einfach ausgelegt werden. Allerdings gibt es bei dieser Abscheidungsmethode eine vergleichsweise große Gefahr von Partikel-Verunreinigungen, die durch die Gasphasen-Reaktionen verursacht werden.

Bei LPCVD Technik wird die Gefahr von Partikel-Verschmutzungen durch den reduzierten Druck deutlich verringert. Der Bereich des typischen Arbeitsdruckes bei der LPCVD liegt normalerweise zwischen  $10^{-3}$  mbar und 1 mbar. Mit der

LPCVD können amorphe oder polykristalline Schichten mit sehr hoher Reinheit abgeschieden werden. Die Stufenbedeckung der mit LPCVD abgeschiedenen Schichten ist winkelgetreu, d.h., dass bei der Abscheidung auf den strukturierten Substraten, die Dicke der abgeschiedenen Schicht überall gleich ist, unabhängig von der Richtung des Normalvektors der unten liegenden Fläche. Die Nachteile von LPCVD sind hauptsächlich die niedrige Abscheiderate und die relativ hohe Substrat-Temperatur. Eine Anhebung des Arbeitsdrucks um die Abscheiderate zu erhöhen, kann zu Partikelverschmutzungen aus Gasphasen-Reaktionen führen. Wenn man die Substrat-Temperatur erniedrigt, wird die Abscheiderate inakzeptabel klein. Um Schichtabscheidungen mit hoher Abscheiderate und niedriger Substrat-Temperatur durchzuführen, wurde die PECVD-Technik in die mikroelektronische Industrie eingeführt.

Weil in PECVD Gasmoleküle einen großen Teil der Aktivierungsenergie durch ein Plasma bekommen, kann das Substrat während des Prozesses auf niedriger Temperatur gehalten werden. Die Tatsache, dass mit Hilfe der PECVD-Technik Schichten mit guter Qualität bei niedriger Temperatur und mit hoher Abscheiderate abgeschieden werden können, lässt PECVD zu einer wichtigen Abscheidungsmethode insbesondere nach der Metallisierung in CMOS Technologie werden. Nicht nur die Prozess-Temperatur, sondern auch die Prozess-Zeit spielt eine Rolle bei der Degradation der Metall Leiterbahnen oder bei der unerwünschten Dotierstoff-Diffusion wegen Hochtemperatur. Die hohe Abscheiderate und die niedrige Prozess-Temperatur von PECVD halten die Prozess-Zeit kurz, und die Prozess Temperatur niedrig, und somit wird das Problem effektiv gelöst. Aufgrund dieser Vorteile wird PECVD auch eine wichtige Abscheidungsmethode für Post-CMOS-Prozesse, z.B., in MEMS-Technologie. Die im Plasma erzeugten Radikale sind sehr reaktiv, und die Beweglichkeit von solchen Radikalen auf der Oberfläche des Substrates ist ziemlich hoch. Die hohe Beweglichkeit der Radikale lässt die Radikale leicht auf der Oberfläche des Substrates migrieren, was zu einer guten Stufenbedeckung führt. Weil Prozessgase im Plasma in komplizierte chemische Spezies zerlegt werden, und die so produzierten Radikale sehr aktiv sind, ist die Stöchiometrie der mit PECVD abgeschiedenen Schicht normalerweise nicht so gut wie die der mit LPCVD abgeschiedenen Schicht. Außerdem werden bei PECVD unerwünschte chemische Produkte in die abgeschiedene Schicht eingebettet, wie z. B.  $H_2$ ,  $N_2$ , und  $O_2$ . Wenn zu viele solche unerwünschte chemische Beiprodukte in die Schicht integriert werden, können verschiedene Probleme auftauchen, wie zum Beispiel: 1) Ausgasung, Blasen-Bildung und Schicht-Abplatzen, besonders bei späteren Hochtemperatur-Prozessen; 2) Abweichen der Schwellenspannung der MOS Transistoren.

**Tabelle 3.1:** Vergleich der drei in der mikroelektronischen Industrie häufig eingesetzten chemischen Gasphasenabscheidungsverfahren: APCVD, LPCVD und PECVD.

	<i>APCVD</i>	<i>LPCVD</i>	<i>PECVD</i>
Arbeitsdruck (mbar)	1000	$10^{-3}$ –1	ca. 1
Art der Aktivierung	thermisch	thermisch	elektromagnetisch und thermisch
Substrat-Temperatur (°C)	400–1300	500–1000	200–500
Vorteile	Hohe Abscheiderate, Einfacher Reaktor	Hervorragende Reinheit und Uniformität, winkeltreue Stufenbedeckung	Niedrige Temperatur, hohe Abscheiderate, gute Stufenbedeckung
Nachteile	Schlechte Stufenbedeckung, Partikel-Verschmutzung	Hohe Temperatur, niedrige Abscheiderate	Verunreinigung durch nicht erwünschte chemische Species, Partikel-Verschmutzung
Anwendung	Si-Epitaxie, Niedertemperatur Oxid	Amorphe und polykristalline Schichten: Poly-Si, Silizium Nitrid, Oxid, amorphes Silizium, Silizium-Germanium, Wolfram etc.	

### 3.1.2 Eine kurze Einführung in die Plasmaphysik

Plasma wird oft neben Feststoff, Flüssigkeit und Gas als der vierte Aggregatzustand im Universum betrachtet. Beispiele von Plasmen in der Natur sind Polarlicht, Gewitter oder Flamme. In der Tat existiert 99% der sichtbaren Materie im Universum in der Form von Plasma. Langmuir hatte im Jahr 1929 das erste Mal den Begriff „Plasma“ verwendet, um ionisierte Gase zu beschreiben [31].

Unter dem Begriff „Plasma“ versteht man normalerweise ein teilweise ionisiertes quasineutrales Gas, das aus neutralen Teilchen (inklusive Molekülen und Molekülfragmenten), Ionen und freie Elektronen besteht. Die Formulierung „quasineut-

ral“ stammt aus der Tatsache, dass in Plasma lokale Ladungskonzentrationen in sehr kleinen Volumina vorhanden sind, während das Gas insgesamt neutral ist. Die Dimensionen der kleinen Volumina sind in der Größenordnung von  $\lambda_D$ , der Debye-Länge des Plasmas. Für ein stabiles Plasma muss gelten, dass die Dimension des Plasmas viel größer als die Debye-Länge ist.  $\lambda_D$  wird definiert als

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{kT_e \epsilon_0}{n_e e^2}}, \quad (3.1)$$

wobei  $\epsilon_0$ ,  $k$ ,  $T_e$ ,  $n_e$  und  $e$  der Permittivität des Vakuums, Boltzmann-Konstante, Temperatur der Elektronen, Elektronen-Dichte in Plasma und der Elementarladung entsprechen.

Wenn Plasma in ein elektrisches Feld gebracht wird, reagieren die Elektronen und die Ionen auf das elektrische Feld. Da die Elektronen viel kleiner und leichter als die Ionen sind, reagieren die Elektronen viel schneller als die Ionen. Wenn überschüssige positive oder negative Ladungen in Plasma existieren, wird die Kompensation der Ladungen hauptsächlich durch die Bewegung der Elektronen realisiert. Die Abschirmung des lokalen elektrischen Feldes durch die freien Ladungen heißt Debye-Abschirmung.

Eine Punktladung mit der Elektrizitätsmenge  $q$  erzeugt in Vakuum das elektrische Feld

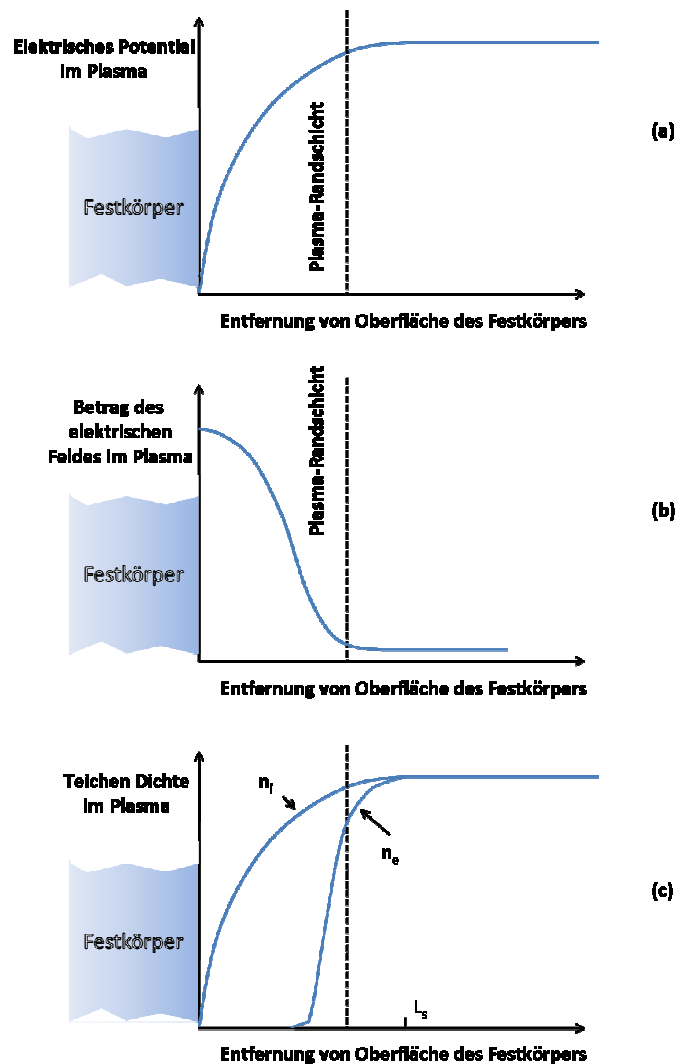
$$E_0(d) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 d^2}, \quad (3.2)$$

wobei  $d$  die Entfernung des Punktes im Raum von der Punktladung ist [30]. Wenn diese Punktladung in ein Plasma eingesetzt wird, schirmen die Elektronen und die Ionen im Plasma das elektrische Feld von der Punktladung ab, so dass das elektrische Feld nur in der direkten Nähe der Punktladung noch deutlich vorhanden ist. Eine Punktladung in Plasma erzeugt ein elektrisches Feld wie folgt:

$$E_p(d) = E_0(d) \exp\left(-\frac{d}{\lambda_D}\right). \quad (3.3)$$

Aus Gleichung 3.3 ist zu erkennen, dass die Debye-Länge die Abschwächung des elektrischen Feldes  $E_0$  im Plasma charakterisiert, und sie physikalisch die Abfall-Länge von  $E_0$  in Plasma bedeutet.

Wenn Festkörper-Oberflächen mit Plasma in Kontakt gebracht werden, nehmen diese Oberflächen negativere elektrische Potentiale als das Plasma-Volumen, d.h., dass das Plasma-Volumen immer elektrisch positiver als die Festkörper-Oberflächen ist. Wegen des Effektes der Debye-Abschirmung wird der Abfall der Potentiale nur auf eine dünne Schicht mit positiven Raumladungen zwischen den Festkörper-Oberflächen und dem Körper des Plasmas beschränkt. Diese Schicht heißt Plasma-Randschicht (*plasma sheath*), mit der Dicke von einigen Debye-Längen.



**Abbildung 3.2:** Die Verteilung vom elektrischen Potential im Randgebiet des Plasmas (a), wo das Plasma mit einer Festkörper Oberfläche in Kontakt ist, und die Verteilung vom elektrischen Feld in demselben Gebiet (b), und die Verteilung der Teilchen Dichte in demselben Gebiet.

In Abbildung 3.2 werden die Verteilung des elektrischen Potentials, des elektrischen Feldes und der Teilchendichte im Plasma-Randgebiet schematisch dargestellt.

stellt.  $n_i$  und  $n_e$  in (c) der Abbildung 3.2 stehen entsprechend für die Dichte der Ionen und die Dichte der Elektronen in Plasma. (a) in Abbildung 3.2 zeigt die Verlauf des Abfalls des elektrischen Potentials in der Randschicht des Plasmas. Zwischen elektrischem Potential und elektrischem Feld besteht der Zusammenhang

$$\vec{E}(\vec{r}) = -\nabla\Phi(\vec{r}), \quad (3.4)$$

wobei  $\vec{E}$  das elektrische Feld ist,  $\Phi$  für elektrisches Potential steht und  $\vec{r}$  den Ortsvektor repräsentiert. Wegen Gleichung 3.4 befindet sich das elektrische Feld in Plasma auch hauptsächlich in der Plasma-Randschicht. Die Elektronen und Ionen bekommen ihre Energie hauptsächlich in der Plasma-Randschicht, da es dort das stärkste Feld in Plasma gibt. Die Energien der geladenen Teilchen in Plasma haben wesentlichen Einfluss auf den PECVD-Prozess. Deswegen ist die Plasma-Randschicht der wichtigste Teil des Plasmas. Wegen der Poisson-Gleichung

$$\Delta\Phi(\vec{r}) = -\frac{\rho(\vec{r})}{\epsilon_r \epsilon_0} \quad (3.5)$$

sind Raumladungen auch nur in der Plasma-Randschicht zu finden.  $\rho$  und  $\epsilon_r$  in Gleichung 3.5 repräsentieren entsprechend die Ladungsdichte und die relative Permittivität. In (c) der Abbildung 3.2 ist zu erkennen, dass innerhalb der Plasma-Randschicht beziehungsweise bis in der Nähe der Plasma-Randschicht die Ionen-Dichte  $n_i$  größer als die Elektronen-Dichte  $n_e$  ist, das heißt, dass in diesem Bereich positive Raumladungen vorhanden sind.

Wenn ausreichende Energie (mehr als die Ionisierungsenergie der Gasatome) an Gasatome übergeben wird, kann ein Plasma zustande kommen. Die Quellen der Anregungsenergie können unterschiedlich sein, zum Beispiel, thermisch, elektrisch, oder elektromagnetisch. Die einfachste Methode um ein Plasma zu erzeugen ist das Aufheizen des Gases. Das auf diese Weise produzierte Plasma hat die gleich heißen Elektronen und schweren Teilchen (Ionen, Radikale, Atome, Moleküle und Molekülfragmente), das heißt, dass die Elektronen-Temperatur und die Schwer-Teilchen-Temperatur gleich hoch sind. Solche Plasmen werden als thermische Plasmen benannt. In thermische Plasmen sind die Elektronen und die schweren Teilchen im thermodynamischen Gleichgewicht. Um thermische Plasmen zu bekommen müssen die Plasmen auf eine sehr hohe Temperatur erhitzt werden, z.B., 4.000 K für manche leicht ionisierbare Gase wie Cäsium, oder so hoch wie 20.000 K für manche schwer ionisierbare Gase wie Helium [32]. Solche hohe Temperaturen machen die Verwendung der thermischen Plasmen in der Halbleiterproduktion unmöglich, weil solche Temperaturen die Halbleiter Wafer beschädigen können, die in Kontakt mit den Plasmen gebracht werden. Wenn Ga-

se mit relativ kleinen Drücken in ein ausreichend starkes elektrisches Feld gebracht werden, können die Gase auch in den Plasmazustand überführt werden. Die Elektronentemperatur in solchen Plasmen ist viel höher als die Schwer-Teilchen-Temperatur, beziehungsweise viel höher als die Gas-Temperatur. Die Elektronentemperatur kann so hoch wie  $10^4$ - $10^5$  K sein [33], während die Gas-Temperatur so tief wie Raumtemperatur sein kann. Solche Plasmen werden als kalte Plasmen benannt. In kalten Plasmen sind die Elektronen und die schweren Teilchen nicht im thermodynamischen Gleichgewicht. Alle in Halbleitertechnologien verwendeten Plasmen sind kalte Plasmen wegen ihrer niedrigen Gas-Temperatur.

### 3.1.3 PECVD Kammer und Gas-Verweilzeit in der Kammer

In der Halbleiterindustrie wird PECVD hauptsächlich für die Abscheidung von Zwischen- oder Viooxid und Passivierung verwendet. Weil mit PECVD niedrige Substrat-Temperaturen und hohe Abscheidungsraten erzielt werden können, ist sie heutzutage eine populäre Methode für die Schicht-Abscheidung nach der Metallisierung. Bei der Herstellung von MEMS (*Microelectromechanical systems*) über CMOS-Schaltungen spielen die PECVD-Methode daher eine wichtige Rolle.

Das Plasma bei PECVD wird durch hochfrequente (HF) elektromagnetische Felder induziert und aufrechterhalten. Die meisten verwendete Frequenz ist dabei 13,56 MHz, weil diese eine der Frequenzen ist, die von FCC (*Federal Communications Commission*) und anderen internationalen Kommunikationsautoritäten für industrielle Anwendungen besonders vorgesehen sind. Eine limitierte Menge von Strahlung bei dieser Frequenz wird die HF-Kommunikationen nicht stören.

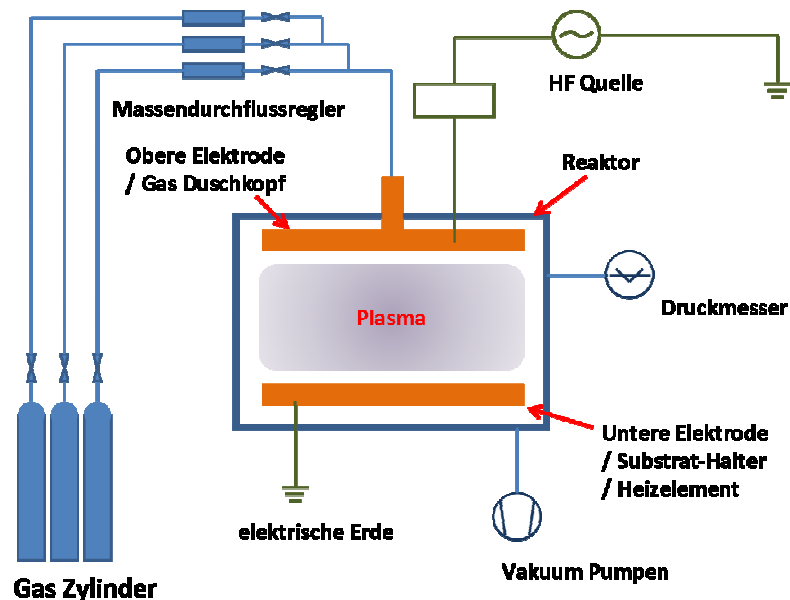


Abbildung 3.3: Eine schematische Darstellung von PECVD System.

In Abbildung 3.3 wird ein PECVD-System schematisch dargestellt. Es besteht üblicherweise aus den folgenden Subsystemen, die verschiedenen Funktionen besitzen:

1. Gas-Handling System inklusive Gasversorgungsanlagen, Massendurchflussregler und Drucksteuerungsanlagen (Pumpen, Druckmesser und Druckregler). Präkursor-Chemikalien werden normalerweise in Gas Form in Metall-Zylinder bewahrt. Manchmal werden auch flüssiger oder fester Präkursor in den Zylinder für die Versorgung der PECVD Prozesse gehalten, wenn sie geeignete Dampfdrucke besitzen.
2. Prozessreaktor. Heutzutage werden 3 Sorten von PECVD-Reaktoren in der Halbleiterindustrie verwendet: a) Reaktor mit parallelen Elektroden für mehrfache Wafer; b) Reaktor für schrittweise Bearbeitung mehrfacher Wafer; c) Reaktor für einzelnen Wafer. Detaillierte Information über die 3 verschiedenen Reaktor-Sorten können in [32] gefunden werden.
3. HF Quelle und Leistungsanpassungsnetzwerk. Sie erhalten das Plasma im Prozess Reaktor aufrecht. Die Leistung der HF Signale hängt mit der Energie der geladenen Teilchen in Plasma stark zusammen, und die Letztere hat eine wesentliche Bedeutung bei der Schichten-Abscheidung. Der Gasduschkopf (Verteiler von Präkursor-Gasen) wirkt typischerweise auch gleichzeitig als die obere Elektrode, und die untere Elektrode dient üblicherweise auch als Substrat Halter, in dem Heizelemente auch integriert werden können.
4. Sicherungsanlagen gegen gefährliche Gase. Die in PECVD verwendeten Gase sind meistens sehr gefährlich. Sie können explosiv, brennbar, korrosiv oder giftig sein. Zum Beispiel ist das weit eingesetzte Monosilan ( $\text{SiH}_4$ ) sehr instabil. Es kann sich an der Luft entzünden. Gase wie Monogerman ( $\text{GeH}_4$ ), Diboran ( $\text{B}_2\text{H}_6$ ) oder Phosphin ( $\text{PH}_3$ ) sind sehr giftig. Um die Gefahr aus solchen Gasen zu vermeiden, werden Sicherungsanlagen benötigt, wie Gassensoren, Sicherheitsventile, und Gaswäscher für die Abgase.

Generell lassen sich CVD-Reaktoren in Kalt-Wand-Reaktoren und Heiß-Wand-Reaktoren unterteilen. Wenn die Temperatur der Wand  $T_w$  tiefer als die des Substrathalters  $T_H$  ist, heißt der Reaktor Kalt-Wand-Reaktor. Falls  $T_w = T_H$  gilt, heißt dann der Reaktor Heiß-Wand-Reaktor. Obwohl der Kalt-Wand-Reaktor so benannt wird, ist seine Wand-Temperatur typischerweise viel höher als die Raumtemperatur. Um unerwünschte Abscheidungen oder Reaktionen an der Reaktor-Wand zu unterdrücken, muss eine Wand-Kühlung eingesetzt werden. Die meisten PECVD-Reaktoren gehören zu den Kalt-Wand-Reaktoren, wie in Abbildung 3.3 dargestellt wird, wobei die Wafer während des Prozesses durch den untenliegenden Substrathalter erhitzt werden, und die Reaktor-Wand dabei nicht speziell erhitzt wird.

Wichtige Parameter bei PECVD-Abscheidungen sind Gasdruck in der Kammer, Substrat-Temperatur, die dem Plasma zugelierte elektrische Leistung und Fluss-



rate der Präkursorgase. Unter ihnen sind Druck  $p$  und Flussrate  $\zeta$  die Parameter, mit denen die Verweilzeit  $t_v$  der Gas-Teilchen im PECVD-Reaktor eingestellt werden kann. Die Verweilzeit spielt eine wichtige Rolle für die chemischen Eigenschaften des Plasmas, und sie ist proportional zum Quotient  $p/\zeta$ , das heißt, es gilt

$$t_v \propto \frac{p}{\zeta}. \quad (3.6)$$

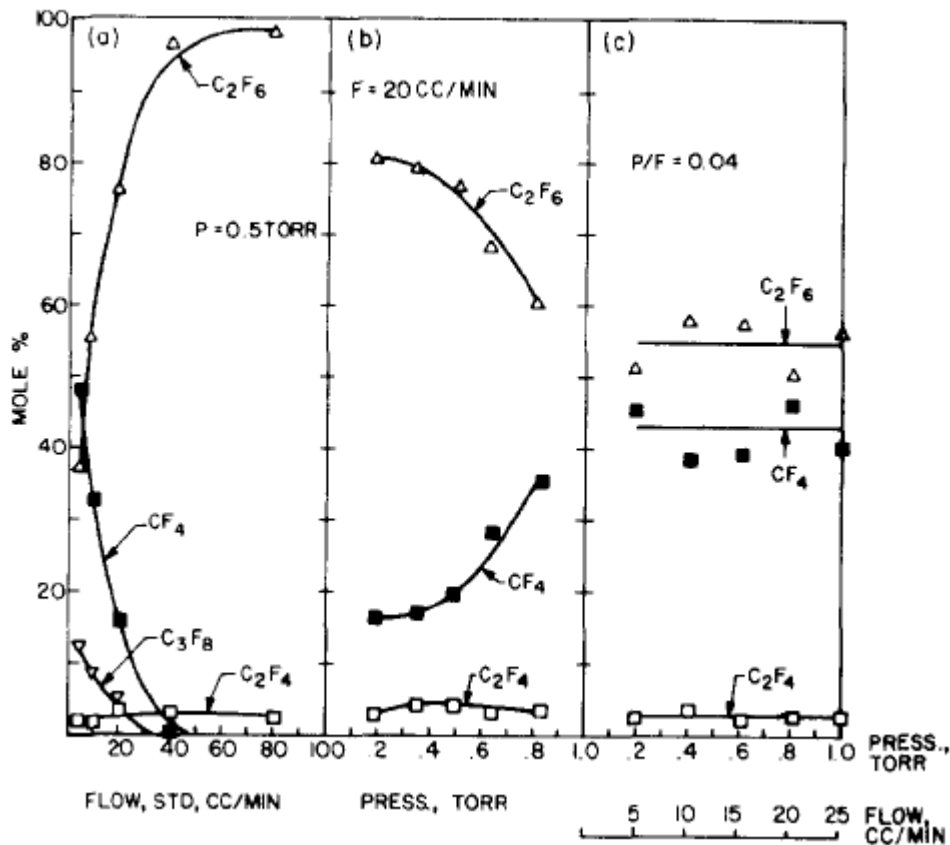
Truesdale und seine Gruppe haben die Dekomposition von  $C_2F_6$  in einem 50W-Plasma untersucht [34]. Dabei wurden die Produkte aus der Dekomposition des Plasmas im Abgas mit einem Quadrupol-Massenspektrometer gemessen. Konzentrationen von  $C_2F_6$ ,  $CF_4$  und  $C_2F_4$  wurden im Abgas bestimmt. Abbildung 3.4 ist direkt aus [34], in der die Ergebnisse der Messungen dargestellt werden. Wenn einer der beiden Parameter (Druck oder Flussrate) konstant gehalten wird, während der andere variiert, verändert sich der Anteil der Gase. Wenn die beiden Parameter sich variieren, dabei der Quotient aus beiden Parametern konstant gehalten wird, bleiben die Anteile der Gase fast ohne Änderungen. Aus diesen Ergebnissen kann gefolgert werden, dass die Verweilzeit der Gas-Teilchen in dem Reaktor die chemischen Eigenschaften der Gase bestimmt.

Um die Gas-Teilchen-Verweilzeit im Reaktor zu variieren, sollte die Flussrate der Gase anstatt des Drucks angepasst werden. Die Variation des Drucks kann zu der Veränderung der physikalischen Eigenschaften des Plasmas führen. Wenn der Druck verändert wird, ändert sich auch die Stoßrate der Ionen im Plasma. Die Energie, mit der die Ionen die Oberfläche eines Wafers auf der Elektrode treffen, hängt nicht nur von dem elektrischen Feld der Plasma-Randschicht und dem Ionisationsgrad, sondern auch von der Stoßrate zwischen einem Ion und einem neutralen Teilchen ab, wenn das Ion die Plasma-Randschicht durchquert [35]. Wenn ein Ion durch die Plasma Randschicht tritt, wird es mit dem elektrischen Randschicht-Feld beschleunigt. Es verliert eine bestimmte Menge Energie, wenn es gegen ein neutrales Teilchen stößt. Wenn die mittlere freie Weglänge des Ions kleiner als die Dicke der Plasma Randschicht ist, gilt die folgende Relation:

$$U_i \approx El, \quad (3.7)$$

mit der Annahme, dass bei jedem Stoß die gesamte Energie des Ions verliert wird, wobei  $U_i$  die kinetische Energie des Ions an der Oberfläche des Wafers symbolisiert,  $E$  das elektrische Feld innerhalb der Plasma Randschicht ist, das als konstant innerhalb einer mittleren freien Weglänge des Ions  $l$  angenommen wird. Wenn  $l$  größer als die Dicke der Plasma-Randschicht ist, wird das Ion mit dem

gesamten Abfall des elektrischen Potenzials der Plasma-Randschicht beschleunigt, und das Ion schlägt auf die Oberfläche des Wafers mit einer hohen Energie.

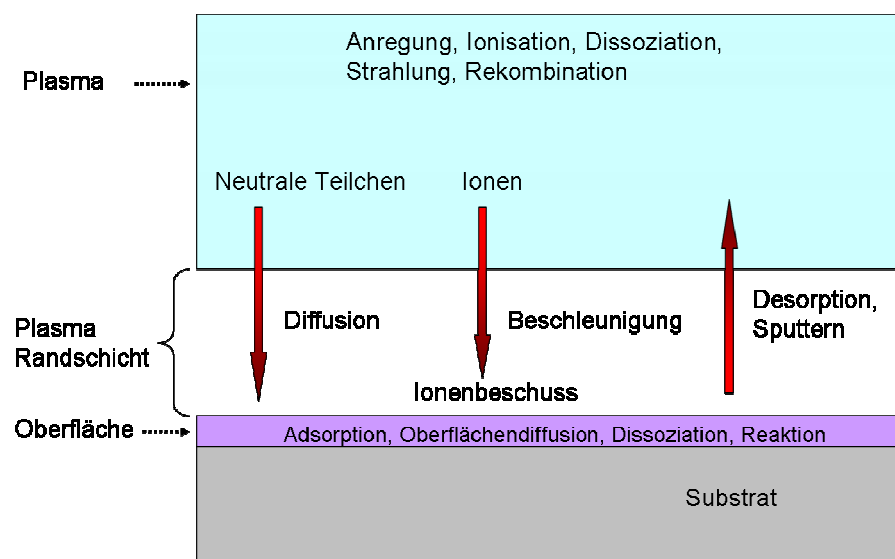


**Abbildung 3.4:** Konzentrationen der verschiedenen Gase in dem Abgas einer 50W-C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>-Entladung; (a) Der Druck ist konstant, während die Flussrate sich variiert; (b) Der Flussrate ist konstant, während der Druck sich variiert; (c) Der Druck und die Flussrate sich variieren, während der Quotient von Druck und Flussrate konstant gehalten wird (Direkt aus [34]).

### 3.1.4 Einfluss der Plasma-Parameter auf die Eigenschaften der abgeschiedenen Schichten

Der Mechanismus der Filmbildung bei PECVD ist viel komplizierter als der bei CVD. Bei Letzterem ist das thermische Gleichgewicht vorhanden, und die Reaktionen finden fast nur auf der Waferoberfläche statt. Allerdings gibt es bei PECVD auch Gasphasen-Reaktionen innerhalb des Plasmas, und die Reaktionen im Plasma und auf der Waferoberfläche sind gleich bedeutend für die Filmbildung. In Abbildung 3.5 werden die bei PECVD vorkommenden Reaktionen und Prozesse schematisch dargestellt. Innerhalb des Plasmas können Atome und Moleküle in höhere Energiezustände angeregt oder sogar ionisiert werden. Moleküle können in Atome oder Molekülsegmente dissoziiert werden. Gleichzeitig können auch um-

gekehrte Prozesse stattfinden, nämlich Strahlung oder Rekombination. Die im Plasma erzeugten Teilchen, angeregte Atome und Moleküle, Radikale, Ionen, können zur Waferoberfläche diffundieren, und Ionen können durch das elektrische Feld über der Plasma-Randschicht beschleunigt werden, und folglich können sie die Waferoberfläche beschleunigen. Nachdem die Teilchen die Waferoberfläche erreichen, können sie von der Oberfläche adsorbiert werden, und sie können sich danach auch entlang der Oberfläche bewegen. Moleküle oder Molekülsegmente können sich wegen der Wafertemperatur auf der Oberfläche dissoziieren. Chemische Reaktionen können auf der Oberfläche stattfinden, und Atome können in den Film gebunden werden. Die adsorbierten oder durch Sputtern abgelösten Teilchen können auch in das Plasma zurück diffundieren.



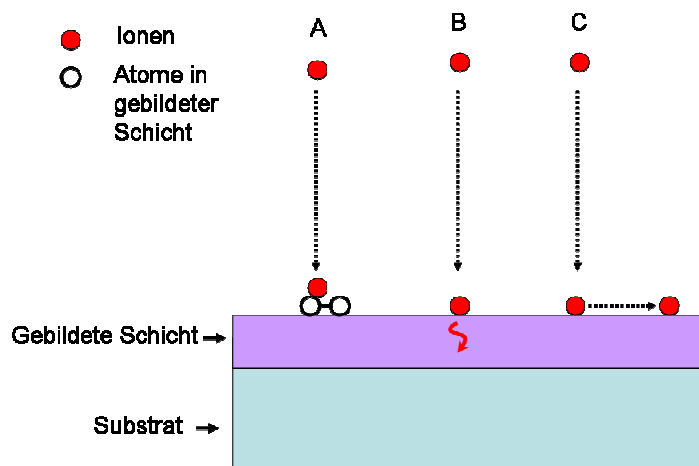
**Abbildung 3.5:** Schematische Darstellung der bei PECVD vorkommenden Reaktionen und Prozesse.

Wie bereits in dem vorherigen Abschnitt erwähnt bestimmt die Teilchenverweilzeit im Plasma  $t_v$  die chemischen Eigenschaften des Plasmas. Dadurch kann die Komposition des abgeschiedenen Films beeinflusst werden, zum Beispiel bei der Abscheidung von Siliziumnitrid, wobei das Verhältnis zwischen Si- und N-Atomen des abgeschiedenen Films bei der Variation der Verweilzeit verändert werden kann.

Die Energie der an der Waferoberfläche ankommenden Ionen spielt bei der Filmbildung eine wichtige Rolle. Bei manchen Schichtenabscheidungen kann die Ionenenergie bestimmen, ob die Schicht kristallin oder amorph ist. In Abbildung 3.6 werden die an der Waferoberfläche ankommenden Ionen mit verschiedenen Energien schematisch dargestellt. Man kann vereinfacht drei Fälle unterscheiden. Im Fall A schlägt das anfallende Ion auf ein in der Schicht gebundenes Atompaar, und mit seiner hohen Energie bricht es die chemische Bindung zwischen den Atomen.

Das Ion mit solcher Energie beeinträchtigt die Kristallinität der Schicht. Im Fall B dringt das anfallende Ion wegen seiner hohen Energie in die Schicht ein und erzeugt dabei Beschädigungen in der Schicht. Dieser Mechanismus unterdrückt auch die Kristallinität der Schicht. Im dritten Fall besitzt das Ion eine ausreichende Energie dafür, auf der Waferoberfläche über eine lange Strecke zu diffundieren, bevor es an einer energetisch günstigen Stelle haftet oder durch nachfolgende Teilchen aus dem Plasma blockiert wird. Dieser Fall fördert die Kristallinität der Schicht.

Bei der in Abbildung 3.3 beschriebene Reaktorkonfiguration (kapazitiv gekoppeltes Plasma) spielt der Abstand zwischen den beiden Elektroden  $d_p$  eine wichtige Rolle für die Ionenenergie. Es wird gezeigt, dass die Variation von  $d_p$  die Veränderung des Spannungsabfalls über der Plasma-Randschicht verursacht. Infolgedessen kann das elektrische Feld in der Randschicht beeinflusst werden, und zwar wird es mit dem steigenden  $d_p$  (in der ersten Annäherung umgekehrt proportional) reduziert [36]. Aus der Gleichung 3.7 ist zu ersehen, dass die Energie der an der Waferoberfläche ankommenden Ionen proportional zu dem elektrischen Feld innerhalb der Randschicht ist.



**Abbildung 3.6:** Die an der Waferoberfläche ankommenden Ionen mit verschiedenen Energien. A) Das anfallende Ion bricht die chemische Bindung eines schon in der Schicht gebundenen Atoms; B) Das anfallende Ion dringt in die Schicht ein, und verursacht eine Implantation; C) Das anfallende Ion verfügt über ausreichende Energie, um über eine lange Strecke auf der Waferoberfläche zu diffundieren, allerdings verursacht keine Beschädigungen an der Schicht.

Aus der Gleichung 3.7 ist ersichtlich, dass die Energie der an der Waferoberfläche ankommenden Ionen auch von der mittleren freien Weglänge des Ions  $l$  abhängt.  $l$  ist umgekehrt proportional zu dem Gasdruck  $p$ . Das heißt, dass der Gasdruck neben dem Elektrodenabstand auch die Ionenenergie beeinflusst. Außerdem ist die Ionenenergie auch eine Funktion der Wirkleistung des Plasmas  $P_p$ , die die von der Quelle an das Plasma übergebene Energie repräsentiert. Wenn  $P_p$  steigt, kann ein

Teil der Energie-Erhöhung von den Ionen absorbiert werden, das heißt, dass die Ionenenergie dabei erhöht wird. Andererseits können mehr Ionen mit der gestiegenen Wirkleistung erzeugt werden. Dadurch wird die mittlere freie Weglänge des Ions  $l$  reduziert, was die Energie der an der Waferoberfläche ankommenden Ionen verringern kann. Das heißt, dass der Zusammenhang zwischen Wirkleistung und der Energie der ankommenden Ionen relativ kompliziert ist.

Das Verhalten zwischen der Ionenenergie  $U_i$  und den drei Parametern Wirkleistung des Plasmas  $P_p$ , Gasdruck  $p$  und dem Elektrodenabstand  $d_p$ , kann durch eine vereinfachte Formel beschrieben werden [37]:

$$U_i = \frac{F(P_p)}{d_p \times p}, \quad (3.8)$$

wobei  $F(P_p)$  eine Funktion von  $P_p$  ist. Die Gleichung 3.8 zeigt, dass die Ionenenergie umgekehrt proportional zu dem Produkt aus  $p$  und  $d_p$  ist.

Die Frequenz der Quelle beeinflusst stark den Zustand des Plasmas, und damit die Eigenschaften der abgeschiedenen Schicht. Wenn eine hohe Frequenz wie Radiofrequenz eingesetzt wird, folgen den wechselnden elektrischen Feldern nur die Elektronen im Plasma, und dabei reagieren die Ionen kaum, denn die Ionenmasse ist viel größer als die der Elektronen. Bei einer niedrigen Frequenz folgen die Ionen auch den wechselnden elektrischen Feldern, und bewegen sich, das heißt, dass die Ionen von den elektrischen Feldern auch kinetische Energien erhalten können. In diesem Fall kann der Ionenbeschuss auf die Waferoberfläche verstärkt werden, und durch das „Drücken“ der Ionen kann eine Druckspannung (*compressive stress*) in der Schicht bedingt werden. Das heißt, dass sich die Schicht, abgeschieden mit niedriger Frequenz, dafür eignet, eine Druckspannung zu erzeugen.

### 3.2 Mechanische Grundlagen

Gemäß den verschiedenen Funktionen der MEMS-Systeme gibt es unterschiedliche Anforderungen an die konstruktiven Materialien der entsprechenden MEMS Systeme. Für den thermischen infraroten Sensor ist der Temperaturkoeffizient des spezifischen Widerstandes der konstruktiven Schicht wichtig. Wenn ein Mikrospiegel-System entworfen werden soll, wird in erster Linie der optische Reflexionsgrad der konstruktiven Schicht betrachtet. In anderen Fällen sind, zum Beispiel, die magnetischen Eigenschaften, die piezoresistiven Eigenschaften oder die chemische Beständigkeit der konstruktiven Materialien am bedeutendsten.

Allerdings sind für die meisten MEMS-Systeme die mechanischen Eigenschaften der konstruktiven Materialien nicht vernachlässigbar, weil bei MEMS-Systemen konstruktive Materialien normalerweise in Form von freischwebenden Strukturen

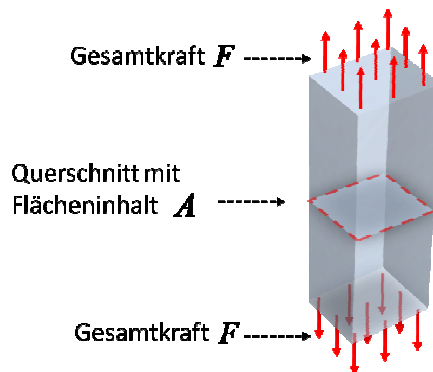
eingesetzt werden. Zum Beispiel bestimmt der Gradient der mechanischen Spannung in einer konstruktiven Membran, ob sich die Membran nach oben oder nach unten biegt, was in einigen Fällen sehr bedeutend für das MEMS-System ist.

In diesem Abschnitt werden mechanische Grundlagen vorgestellt, welche wichtig für das Verständnis des mechanischen Verhaltens des kapazitiven Drucksensors sind. Die meisten MEMS-Systeme arbeiten im Bereich der elastischen Mechanik, das heißt, es wird angenommen, dass die Verformung des Systems verschwindet, wenn die externen Kräfte, die diese Verformung erzeugen, aufgehoben werden. Die Vorstellungen in diesem Abschnitt setzen voraus, dass die betrachteten Systeme sich im Bereich der elastischen Mechanik befinden. Außerdem wird angenommen, dass die mechanischen Eigenschaften der in Frage kommenden Materialien isotrop sind.

### 3.2.1 Mechanische Spannung und Verformung

Mechanische Spannung (*mechanical stress*) ist ein Maß für die durchschnittliche Kraft, ausgeübt an einer Flächeneinheit. Sie hat dieselbe Einheit wie Druck, in dem Internationalen Einheitensystem „Pascal“ (Kürzel: Pa).

Wenn äußere Kräfte an einem Festkörper ausübt werden, verursachen sie innerhalb des Festkörpers zwischen den kleinen Teilen des Festkörpers interne Kräfte. Als das einfachste Beispiel kann eine prismatische Stange betrachtet werden, die durch Kraft  $F$  an den beiden Enden gezogen wird. Es wird angenommen, dass die Kraft  $F$  gleichmäßig über den Enden verteilt wird (Abbildung 3.7).

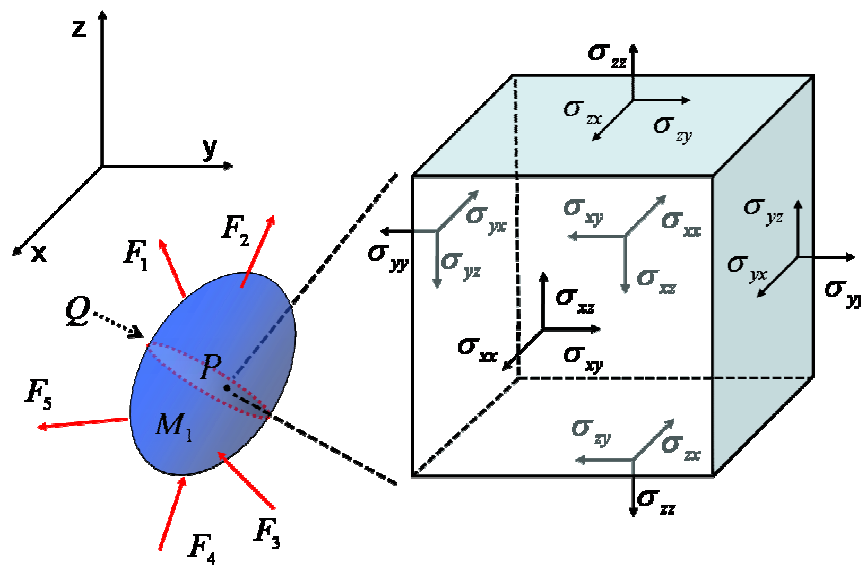


**Abbildung 3.7:** Eine prismatische Stange, die an den beiden Enden mit der gleichmäßig verteilten Kraft gezogen wird.

In diesem Fall gibt es an jedem Punkt auf irgendeinem Querschnitt der Stange die gleiche mechanische Spannung

$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad (3.9)$$

wobei  $\sigma$ ,  $F$  und  $A$  jeweils für die mechanische Spannung, die Gesamtkraft an den Enden der Stange und den Flächeninhalt des Querschnitts stehen. Im Allgemeinen kann der Festkörper beliebige Form annehmen, und die externen Kräfte in beliebiger Weise an dem Festkörper wirken. Wenn in diesem Fall die mechanische Spannung an einem beliebigen Punkt innerhalb des Festkörpers untersucht wird, muss die differentielle Methode für den Flächeninhalt und die darauf auswirkende Kraft verwendet werden.



**Abbildung 3.8:** Komponenten von Spannungstensor

In Abbildung 3.8 wird ein Festkörper „ $M_1$ “ mit einer willkürlichen Form schematisch dargestellt. Die Kräfte  $F_1$  bis  $F_5$  wirken auf den Festkörper  $M_1$ . Die Ebene  $Q$  ist ein Querschnitt durch  $M_1$ , und der Punkt  $P$  liegt in der Ebene  $Q$ . Um die mechanische Spannung am Punkt  $P$  zu beschreiben, wird ein Tensor der 2. Ordnung definiert. Mit diesem Tensor kann die mechanische Spannung auf jeder Ebene durch Punkt  $P$  dargestellt werden.

Es wird ein elementarer Würfel um Punkt  $P$  (Abbildung 3.8) betrachtet. Die 6 Seiten des Würfels sind parallel zu den Achsen des kartesischen Koordinatensystems, in Abbildung 3.8 definiert. Die 6 Begrenzungsflächen des Würfels werden mit  $x$ ,  $\bar{x}$ ,  $y$ ,  $\bar{y}$ ,  $z$  und  $\bar{z}$  gemäß den Normalvektoren der Begrenzungsflächen gekennzeichnet. An jeder Begrenzungsfläche werden 3 Spannungskomponenten definiert. Die Komponenten senkrecht zu jeder Begrenzungsfläche werden Nor-

malspannungen benannt, und die Komponenten, die tangential zu diesen Flächen wirken, werden Schubspannungen benannt, da sie eine Scherung-Belastung darstellen. Zum Beispiel, auf der  $x$ -Fläche ist  $\sigma_{xx}$  die Normalspannung, und  $\sigma_{xz}$  und  $\sigma_{xy}$  sind die Schubspannungen, wobei der erste tiefgestellte Index  $x$  andeutet, dass diese Spannungskomponenten auf der Begrenzungsfläche wirken, deren Normalvektor parallel zu der  $x$ -Achse ist, und die zweiten tiefgestellten Indizes die Achsen angeben, zu denen diese Spannungskomponenten parallel liegen. Aufgrund der Gleichgewichtsbedingung stimmen die Spannungskomponenten der gegeneinander stehenden Begrenzungsflächen miteinander überein, wenn diese Komponenten parallel zu derselben Koordinatenachse liegen. Die positiven Richtungen der Spannungskomponenten werden in Abbildung 3.8 mit Pfeilen angegeben. Die Normalspannungen werden als positiv definiert, wenn sie den Zug des Elementarwürfels herbeiführen, und negativ, wenn sie die Kompression auslösen. Wenn die positive Richtung der Normalspannung einer Begrenzungsfläche mit der positiven Richtung einer Koordinatenachse übereinstimmt, stimmen auch die positiven Richtungen der Schubspannungen an derselben Fläche mit denen der Koordinatenachsen überein. Wenn die positive Richtung der Normalspannung an einer Fläche die negative Richtung einer Koordinatenachse nimmt, nehmen dann die positiven Richtungen der Schubspannungen an denselben Flächen auch die negativen Richtungen der entsprechenden Koordinatenachsen ein.

Der Spannungstensor wird mit 9 Spannungskomponenten gebildet

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix}. \quad (3.10)$$

Es gilt aufgrund von Gleichgewichtsbedingungen

$$\sigma_{xy} = \sigma_{yx}, \sigma_{yz} = \sigma_{zy} \text{ und } \sigma_{xz} = \sigma_{zx}. \quad (3.11)$$

Das bedeutet, der Spannungstensor eine symmetrische Matrix ist, und sie nur 6 unabhängigen Komponenten besitzt. Wenn die folgenden Bezeichnungen verwendet werden,

$$\sigma_1 = \sigma_{xx}, \sigma_2 = \sigma_{yy}, \sigma_3 = \sigma_{zz}, \sigma_4 = \sigma_{yz}, \sigma_5 = \sigma_{xz}, \sigma_6 = \sigma_{xy}, \quad (3.12)$$

wird der Spannungstensor



$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_1 & \sigma_6 & \sigma_5 \\ \sigma_6 & \sigma_2 & \sigma_4 \\ \sigma_5 & \sigma_4 & \sigma_3 \end{pmatrix}. \quad (3.13)$$

Gemäß der Theorie der Elastizität erzeugen die mechanischen Spannungen innerhalb eines Festkörpers die Verformungen des Festkörpers. Wird ein Festkörper der mechanischen Spannungen ausgesetzt, bewegen sich die Teilchen des Festkörpers von den ursprünglichen Positionen zu den neuen Positionen, was die Verformung des Körpers verursacht.

Unter dem Begriff „mechanische Verformung“ versteht man Dehnung, Schrumpfung und Winkelverzerrung von 2 beliebigen Richtungen. Alle solche Verformungen können durch einen Verformungstensor dargestellt werden, der nachfolgend vorgestellt wird.

Die Versetzung eines Punktes  $P$  kann entlang 3 Koordinatenachsen,  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Achse, entsprechend in 3 Komponenten,  $u$ ,  $v$  und  $w$ , zerlegt werden. Es ist angenommen, dass die Versetzungen kontinuierlich über dem Körper variieren. Ein kleiner Quader (Abbildung 3.9) mit den Kantenlängen  $dx$ ,  $dy$  und  $dz$  wird betrachtet. Punkt  $P$  ist ein Eckpunkt des Quaders. Die Strecke  $PA$  ist parallel zu der  $x$ -Achse, das heißt, dass der Punkt  $A$  in der positiven  $x$ -Richtung mit einer Distanz  $dx$  vom Punkt  $P$  entfernt ist. Wenn die Versetzungen an dem Punkt  $P$   $u_P$ ,  $v_P$  und  $w_P$  betragen, kann die Versetzungskomponente parallel zu  $x$ -Achse an dem Punkt  $A$  angenähert werden als

$$u_A = u_P + \frac{\partial u}{\partial x}(P)dx. \quad (3.14)$$

$\frac{\partial u}{\partial x}(P)dx$  ist die Verlängerung der Strecke  $PA$  in  $x$ -Richtung wegen der Verformung des Körpers.  $\frac{\partial u}{\partial x}(P)$  ist die Verlängerung pro Inkrement Einheit in der positiven  $x$ -Richtung am Punkt  $P$ .  $\frac{\partial u}{\partial x}$  wird Einheitsdehnung in  $x$ -Richtung benannt. Analog werden  $\frac{\partial u}{\partial y}$  und  $\frac{\partial u}{\partial z}$  entsprechend als Einheitsdehnung in  $y$ - und  $z$ -Richtung benannt.

Bei der Verformung des Körpers werden nicht nur die Längen von Strecken verändert, sondern auch die Winkel zwischen verschiedenen Ebenen verzerrt.

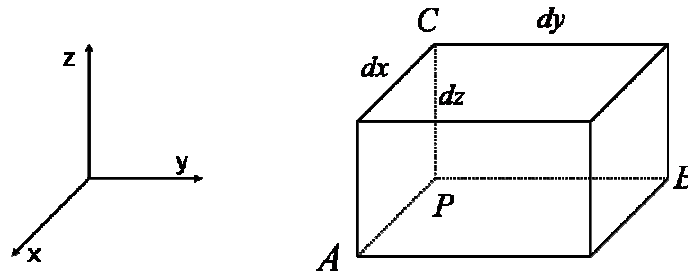


Abbildung 3.9: Ein kleiner Quader mit Punkt  $P$  als ein Eckpunkt.

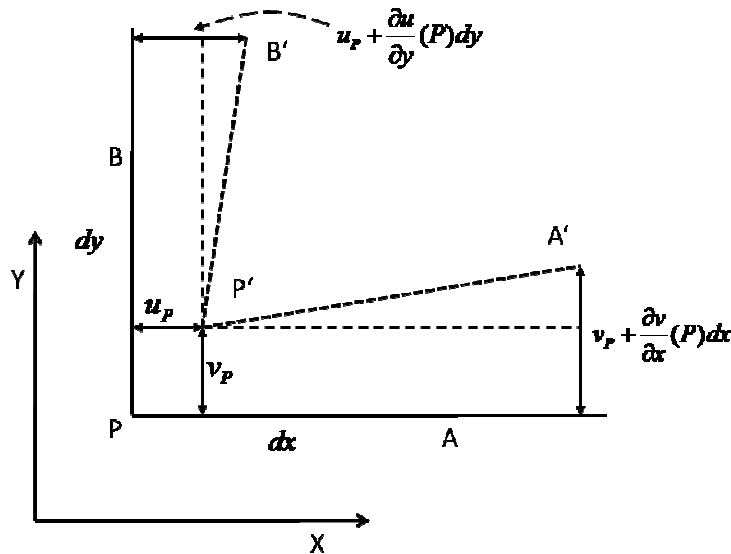


Abbildung 3.10: Verzerrung des Winkels zwischen  $PB$  und  $PA$

In Abbildung 3.10 wird die Verzerrung des Winkels zwischen den Projektionen von  $PA$  und  $PB$  auf die  $xy$ -Ebene betrachtet. Die durchgezogenen Linien  $PA$  und  $PB$  in Abbildung 3.10 stellen die Projektionen der ursprünglichen Strecken  $PA$  und  $PB$  auf die  $xy$ -Ebene dar. Die gestrichelten Linien  $P'A'$  und  $P'B'$  sind die Projektionen von  $PA$  und  $PB$  im verformten Körper. Aufgrund der Verformung werden nicht nur die Längen von  $PA$  und  $PB$  (folglich auch die Längen ihrer Projektionen), sondern auch der Winkel zwischen ihnen (folglich auch der Winkel zwischen ihren Projektionen) verändert. Wenn die Versetzungen am Punkt  $P$  in  $x$ - und  $y$ -Richtungen entsprechend  $u_P$  und  $v_P$  betragen, machen die  $y$ -Versetzung vom Punkt  $A'$  und die  $x$ -Versetzung vom Punkt  $B'$  entsprechend  $v_P + \frac{\partial v}{\partial x}(P)dx$  und  $u_P + \frac{\partial u}{\partial y}(P)dy$  aus. Folglich ist der Winkel  $B'P'A'$  nicht mehr ein rechter Winkel, sondern wird reduziert durch

$$\frac{\partial v}{\partial x}(P) + \frac{\partial u}{\partial y}(P). \quad (3.15)$$

$\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}$  wird als Schubdehnung zwischen  $xz$ - und  $yz$ -Ebene bezeichnet. Analog können die Schubdehnung zwischen  $xy$ - und  $zy$ -Ebene und jene zwischen  $yx$ - und  $zx$ -Ebene definiert werden.

Wenn die Einheitsdehnungen durch

$$\chi_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}, \chi_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} \text{ und } \chi_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z}, \quad (3.16)$$

und die Schubdehnungen durch

$$\chi_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \chi_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \text{ und } \chi_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad (3.17)$$

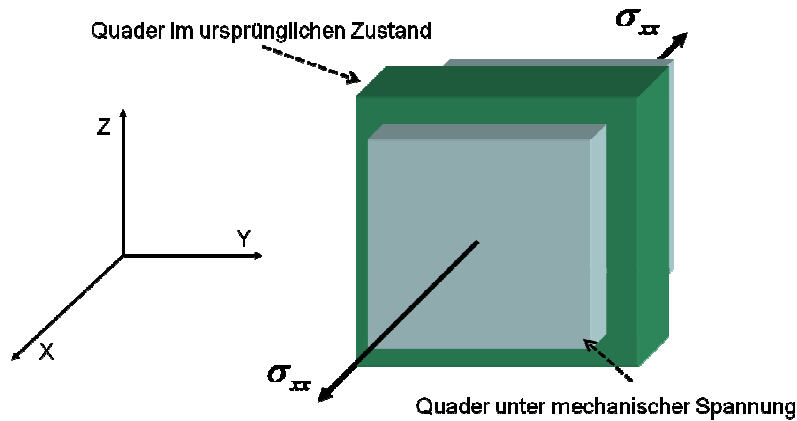
gekennzeichnet werden, kann der Verformungstensor als

$$\chi = \begin{pmatrix} \chi_{xx} & \chi_{xy} & \chi_{xz} \\ \chi_{xy} & \chi_{yy} & \chi_{yz} \\ \chi_{xz} & \chi_{yz} & \chi_{zz} \end{pmatrix} \quad (3.18)$$

definiert werden. Wie oben bereits erwähnt können beliebige Verzerrungen im Körper inklusive Veränderungen der Längen und der Winkel anhand des Verformungstensors berechnet werden. Mechanische Verformung ist eine dimensionslose Größe.

### 3.2.2 Hookesches Gesetz, Elastizitätsmodul und Poissonzahl

Das Hookesche Gesetz beschreibt die lineare Relation zwischen der mechanischen Spannung und der mechanischen Verformung. Um diese lineare Relation zu veranschaulichen, wird ein elementarer Quader (Abbildung 3.11) betrachtet, dessen Begrenzungsflächen zu den Koordinatenachsen parallel sind.



**Abbildung 3.11:** Mechanische Verformung eines elementaren Quaders unter der mechanischen Normalspannung an den gegenüberliegenden  $x$ - und  $\bar{x}$ -Flächen.

Wenn eine mechanische Normalspannung an den gegenüberliegenden Begrenzungsflächen des elementaren Quaders ausgeübt wird, kann die Relation zwischen der Einheitsdehnung in  $x$ -Richtung und der normalen Spannung ausgedrückt werden als

$$\chi_{xx} = \frac{\sigma_{xx}}{Y}, \quad (3.19)$$

wobei  $\chi_{xx}$  und  $Y$  entsprechend für die Einheitsdehnung in  $x$ -Richtung und den Elastizitätsmodul (auch Youngscher Modul, E-Modul) stehen. Da die mechanische Dehnung eine dimensionslose Größe ist, hat der Elastizitätsmodul die Einheit wie die mechanische Spannung, d.h., er hat die Einheit vom Druck. Im internationalen Einheitssystem ist die Einheit für Elastizitätsmodul Pascal (Kürzel: Pa). In der praktischen Anwendung werden meistens MPa ( $10^6$  Pa) oder GPa ( $10^9$  Pa) verwendet. Aus der Gleichung 3.19 ist zu ersehen, dass der E-Modul physikalisch verstanden werden kann als die notwendige mechanische Spannung, die benötigt wird, um die Länge des elementaren Quaders zu verdoppeln, mit der Annahme, dass das Material unter diesem Zustand noch im elastischen Bereich ist. Der E-Modul ist viel größer als die erlaubte maximale mechanische Spannung des Materials.

Während die Länge des elementaren Quaders (Abbildung 3.11) in  $x$ -Richtung unter der Wirkung der Normalspannung  $\sigma_{xx}$  verändert wird, werden die Dimensionen des Quaders in  $y$ - und  $z$ -Richtungen auch aufgrund von  $\sigma_{xx}$  variiert. Wenn der Quader in  $x$ -Richtung verlängert wird ( $\sigma_{xx} > 0$ ), wird er typischerweise in der  $y$ - und  $z$ -Richtungen kontrahiert, wie es in Abbildung 3.11 dargestellt wird. Der

Zusammenhang zwischen der Einheitsdehnung in  $x$ -Richtung und denen in den anderen beiden Richtungen kann wie folgt ausgedrückt werden

$$\chi_{yy} = -\nu\chi_{xx} \text{ und } \chi_{zz} = -\nu\chi_{xx}, \quad (3.20)$$

wobei  $\nu$  für die Poissonzahl des Materials steht. Für viele verschiedene Materialien liegt diese zwischen 0,25 und 0,3.

Wenn die Normalspannungen  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  und  $\sigma_{zz}$  gleichzeitig auf den elementaren Quader wirken, können die Einheitsdehnungen  $\chi_{xx}$ ,  $\chi_{yy}$  und  $\chi_{zz}$  mit Hilfe von Formel 3.19 und 3.20 berechnet werden. Mit der Superposition der von jeder Normalspannung erzeugten Wirkungen können die Einheitsdehnungen dargestellt werden als

$$\begin{aligned} \chi_{xx} &= \frac{\sigma_{xx} - \nu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})}{Y} \\ \chi_{yy} &= \frac{\sigma_{yy} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{zz})}{Y} \\ \chi_{zz} &= \frac{\sigma_{zz} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})}{Y}. \end{aligned} \quad (3.21)$$

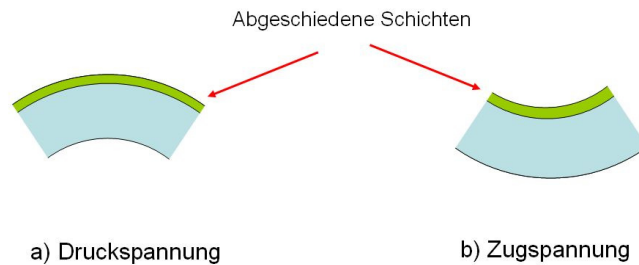
Die Gleichung 3.21 deutet an, dass die Zusammenhänge zwischen den Einheitsdehnungen und den Normalspannungen mit Hilfe von E-Modul und Poissonzahl des Materials völlig definiert werden können. Die Schubdehnungen sind nur von den entsprechenden Schubspannungen abhängig, und es gilt [38]

$$\chi_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{G}, \chi_{yz} = \frac{\sigma_{yz}}{G}, \chi_{xz} = \frac{\sigma_{xz}}{G} \quad (3.22)$$

wobei  $G$  Schubmodul heißt, und definiert wird als

$$G = \frac{Y}{2(1+\nu)}. \quad (3.23)$$

### 3.2.3 Mechanische Spannungen in Dünnschichten



**Abbildung 3.12:** Verformungen eines Wafers werden durch die mechanischen Spannungen in der auf den Wafer abgeschiedenen Schichten bedingt. Die Druckspannung verursacht einen konvexen Wafer a), während die Zugspannung den Wafer konkav macht.

Bei der Produktion von integrierten Schaltungen und Mikrosystemen sind das Kontrollieren und Einstellen von mechanischen Spannungen der dünnen Schichten für die Qualität, Stabilität und Funktionalität der entsprechenden Schaltungen oder Systemen von großer Bedeutung [39]. Bei den meisten Anwendungen ist gewünscht, dass die hergestellten Schichten auf Wafern möglichst frei von mechanischen Spannungen sind. Zu hohe mechanische Spannungen in den dünnen Schichten können zu verschiedenen Problemen führen, wie zum Beispiel schlechte Haftung der Schichten auf den unterliegenden Materialien, unerwünschte elektronische Eigenschaften, Empfindlichkeit für Korrosion, und so weiter. Wenn die mechanische Spannung innerhalb der Schicht den maximal erlaubten Wert des Materials überschreitet, kann es passieren, dass die Schicht zerbricht. Allerdings ist es nahezu unmöglich, Schichten überhaupt ohne mechanische Spannungen zu produzieren, unabhängig davon, welche Abscheidungsverfahren verwendet werden. Deswegen wird manchmal so justiert, dass die Spannungen in den Schichten die erwünschten Eigenschaften besitzen. Zum Beispiel stellte die Gruppe von Blake C.-Y. Lin ihre Mirospiegel so her, dass die Abstützungen der Spiegel einen bestimmten Verlauf von Spannungsgradienten besaßen, und folglich die Spiegel nach oben gehoben wurden [40]. Im Rahmen dieser Promotionsarbeit wurden die mechanischen Spannungen in den Membranen von kapazitiven Drucksensoren so eingestellt, dass die Membranen unter dem Atmosphärendruck nach unten bogen.

Es gibt zwei Arten von mechanischen Spannungen in den dünnen Schichten, nämlich Zugspannungen (*tensile stress*) und Druckspannungen (*compressive stress*). Wenn eine dünne Schicht auf einem Silizium-Wafer abgeschieden wird, erzeugt die mechanische Spannung innerhalb der Schicht eine Verformung des Wafers. Eine Schicht mit Zugspannung macht den Wafer konkav, während eine Schicht mit Druckspannung eine konvexe Form des Wafers bedingt (Abbildung 3.12). Wenn eine Schicht mit einer bestimmten Spannung auf einem ganz flachen Wafer abgeschieden wird, kann die Spannung in der Schicht durch die Verformung des

Wafers teilweise abgebaut werden. So entsteht ein konkaver oder ein konvexer Wafer.

Die Entstehung der mechanischen Spannungen basiert auf der Tatsache, dass die Schicht fest mit dem Substrat verbunden ist, nachdem sie auf dem Substrat abgeschieden wurde. Die mechanischen Spannungen können auf zwei Ursprünge zurückgeführt werden. Zum einen werden die mechanischen Spannungen, die aufgrund von unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten des Substrates und der Schicht existieren, thermische Spannungen genannt. Zum anderen werden die Spannungen, die von Defekten der Schicht, Morphologieveränderungen innerhalb der Schicht oder anderen mit der Schicht in Verbindung stehenden Fakten herrühren, als intrinsische Spannungen bezeichnet [41][42].

Bei den meisten Abscheidungsverfahren für dünne Schichten werden die Substrate auf eine Temperatur, die höher als die Raumtemperatur ist, erhitzt. Die Temperatur von der Messung der Spannung der Schicht ist normalerweise niedriger als die Abscheidungstemperatur. Der Unterschied zwischen dem Wärmeausdehnungskoeffizient des Substrates und dem der Schicht führt dazu, dass die beiden Teile beim Abkühlen unterschiedlich schrumpfen, und folglich die Spannung in der Schicht entsteht. Die so verursachte Spannung kann angegeben werden mit

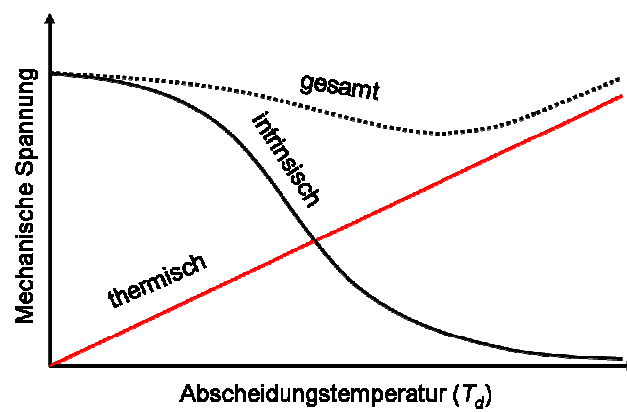
$$\sigma_T = (\alpha_f - \alpha_s)(T_d - T_m)Y_f, \quad (3.24)$$

wobei  $\alpha_f$  und  $\alpha_s$  entsprechend der Wärmeausdehnungskoeffizient der Schicht und des Substrates sind,  $T_d$  und  $T_m$  jeweils die Temperaturen von der Abscheidung und die von der Messung repräsentieren, und  $Y_f$  das Elastizitätsmodul der Schicht bezeichnet.

Allerdings kann die echte Temperatur der Schicht bei der Abscheidung nur sehr schwer bestimmt werden. Z.B. hängt bei PECVD die Temperatur der Probenoberfläche nicht nur von dem Heizelement im Substrat-Halter ab, sondern auch von dem Plasma. Bei der Abscheidung steht die Oberfläche der Proben im direkten Kontakt mit der Randschicht des Plasmas. Dort sind energetische Teilchen, beschleunigt durch das Randschicht-Feld, vorhanden, und sie können die Oberflächentemperatur der Probe beeinflussen. Außerdem finden chemische Reaktionen an der Probenoberfläche statt, und sie können Wärme absorbieren oder emittieren. Deshalb sind die thermischen Spannungen eigentlich schwierig auszurechnen.

Die intrinsische Spannung entsteht aus verschiedenen Gründen. Wie oben erwähnt kann die echte Temperatur der Schicht ganz anders als die des Substrates sein. Eigentlich variiert auch die Schichttemperatur während des Abscheidungsprozesses, was führt dazu, dass die Schicht von unten bis oben unter verschiedenen Be-

dingungen abgeschieden wird. Folglich werden gewisse Spannungen in der Schicht verursacht. Außerdem können Phasenänderungen während des Abscheidungsprozesses stattfinden, inklusive Veränderungen von kristallinen Formen oder von Stöchiometrie. Solche Veränderungen rufen Volumen-Variationen hervor, die auch mechanische Spannungen verursachen können. Der dritte Grund liegt in den elektrischen Ladungen von den Kristalliten, die dazu führen, dass die Kristallite einander anziehen oder zurückstoßen. Dieser Effekt erzeugt auch mechanische Spannungen. Außer den drei oben genannten Gründen können andere Ursachen für die intrinsische Spannung an Defekten, Verunreinigungen und Zwischenräumen existieren. Jedoch sind viele Mechanismen für die Entstehung der intrinsischen Spannung noch nicht gut verstanden.



**Abbildung 3.13:** Die Abhängigkeit der thermischen und intrinsischen Spannung von der Abscheidungstemperatur.

Es scheint, dass die durchschnittliche Spannung der Schicht nicht von der Dicke der Schicht abhängt [41]. Es wurde generell geglaubt, dass die mechanische Spannung in der Schicht hauptsächlich auf die Abscheidungsparameter und nicht auf die Materialien zurückzuführen ist, die direkt unter der Schicht liegen. Allerdings wurde in der vorliegenden Promotionsarbeit gefunden, dass die mechanische Spannung von Schichten aus bestimmten Materialien doch von den unterliegenden Materialien abhängig ist. Die intrinsische Spannung kann teilweise durch Tempern aufgehoben werden. In Abbildung 3.13 wird die typische Abhängigkeit der thermischen Spannung und der intrinsischen Spannung von der Abscheidungstemperatur schematisch dargestellt. In Formel 3.24 ist zu erkennen, dass die thermische Spannung von der Abscheidungstemperatur ( $T_d$ ) linear abhängig ist. Die intrinsische Spannung wird normalerweise immer weniger mit erhöhter Abscheidungstemperatur. So besitzt die gesamte mechanische Spannung ein Minimum.

### 3.2.4 Messung der mechanischen Spannung in Dünnschichten

Die Quantifizierung der mechanischen Spannung in dünnen Schichten ist grundlegend für das Einstellen der Spannung, um Bauelemente mit erwünschten Funk-



tionen und ausreichender Langzeitstabilität zu produzieren. Außerdem ist die Messung der Spannung auch eine Prüfungsmethode, um den Zustand einer Abscheidungsanlage zu überprüfen.

**Tabelle 3.2:** Bedeutung der in Gleichung 3.25 und 3.26 verwendeten Symbole.

<i>Symbol</i>	<i>Bedeutung</i>	<i>Symbol</i>	<i>Bedeutung</i>
$Y_s$	Elastizitätsmodul des Substrats	$b_2$	Durchbiegung ( <i>Bow</i> ) des Substrats nach der Abscheidung der Schicht
$\nu_s$	Poissonzahl des Substrats	$r_s$	Radius des Substrats
$t_s$	Dicke des Substrats	$R_1$	Krümmungsradius des Substrats vor der Abscheidung der Schicht
$t_f$	Dicke der zu untersuchenden Schicht	$R_2$	Krümmungsradius des Substrats nach der Abscheidung der Schicht
$b_1$	Durchbiegung ( <i>Bow</i> ) des Substrats vor der Abscheidung der Schicht		

Es gibt verschiedene Techniken zur Bestimmung der mechanischen Spannung der dünnen Schichten. Generell können sie in zwei Gruppen geteilt werden. Eine Gruppe basiert auf der Messung der Krümmung eines Substrates [43], und die andere Gruppe verwendet Röntgenbeugung [44][45], die die mechanischen Verformungen in der Schicht direkt misst. Außer der genannten zwei Gruppen wurden auch andere Methoden entwickelt, wie Nanoindentierung [46] oder Mikroproben [47]. Für praktische Anwendungen, insbesondere in der Produktion werden jene Methoden, basierend auf der Messung der Substratkrümmung, weitgehend verwendet, weil solche Messungen zerstörungsfrei und einfach durchzuführen sind. Zur Messung der Substratkrümmung können verschiedene Techniken verwendet werden, wie optische Interferometrie [48], Laserscanning, kapazitive Messung, und so weiter. Die Differenz der Substratkrümmungen, die man vor und nach der Abscheidung einer Schicht erhält, ist von der durchschnittlichen Spannung der Schicht linear abhängig. Dieser Zusammenhang wird durch verschiedene Varianten der Stoney-Formel [43] [49] [50] beschrieben.

G. Gerald Stoney hat am Anfang des 20. Jahrhunderts eine Formel für die Rechnung der mechanischen Spannung in einer Nickelschicht abgeleitet, die mit Galvanik auf Stahlblech abgeschieden wurde. Heutzutage werden zahlreiche modifizierte Stoney-Formeln in der Charakterisierung von dünnen Schichten verwendet. Die Stoney-Formel basiert auf der klassischen Biegetheorie von Platten [51][38]. Für die verwendeten kommerziellen Messanlagen hat die Stoney-Formel folgende Formen:

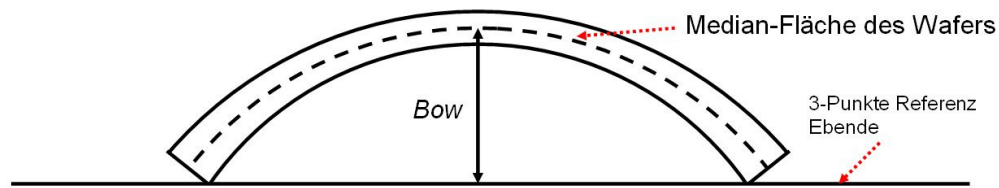
$$\sigma_f = \frac{b_2 - b_1}{r_s^2} \frac{Y_s}{3(1-\nu_s)} \frac{t_s^2}{t_f}, \quad (3.25)$$

$$\sigma_f = \frac{R_1 - R_2}{R_1 R_2} \frac{Y_s}{6(1-\nu_s)} \frac{t_s^2}{t_f}, \quad (3.26)$$

Die Bedeutungen der in Gleichung 3.25 und 3.26 verwendeten Symbole werden in Tabelle 3.2 zusammenfasst. Unter dem Begriff „Durchbiegung (*Bow*)“ des Substrates“ versteht man den Abstand zwischen der Mitte der Median-Fläche eines freien und nicht eingeklemmten Wafers und der Median-Fläche einer durch drei Punkte bestimmten Referenz-Ebene, die auf einem Kreis mit einem Durchmesser, der um eine spezifizierte Menge kleiner als der Nominaldurchmesser des Wafers ist, gleich verteilt sind. In Abbildung 3.14 wird die Messung der Durchbiegung (*Bow*) eines Wafers in Bezug auf eine Referenz-Ebene, die durch drei Punkte am Rand des Wafers bestimmt wird, schematisch gezeigt.

Für die Gültigkeit der in Gleichung 3.25 und 3.26 definierten Stoney-Formeln müssen folgende Bedingungen vorausgesetzt werden:

1. Das Substrat ist dünn im Vergleich mit dem zu untersuchenden Krümmungsradius des Substrats.
2. Das Substrat ist elastisch isotrop.
3. Die Dicke der abgeschiedenen Schicht ist uniform.
4. Die Dicke der Dünnschicht ist viel kleiner als die Dicke des Substrats.
5. Die Temperatur des Dünnschicht-Substrat-Systems ist uniform.
6. Das Dünnschicht-Substrat-System ist mechanisch frei.



**Abbildung 3.14:** Schematische Darstellung der Messung der Durchbiegung (*Bow*) eines Wafers.

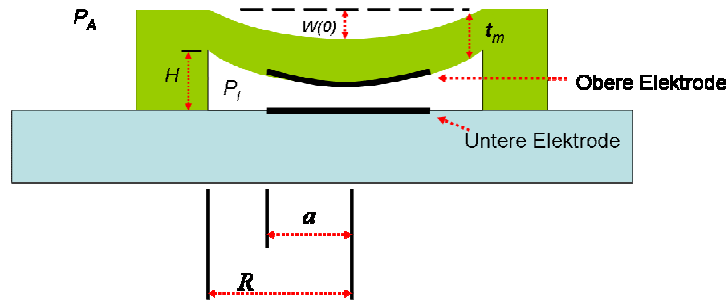
Die meisten der oben angegebenen Bedingungen sind leicht erfüllbar. Allerdings können in vielen praktischen Fällen die Punkte zwei und drei nicht erfüllt werden. Die Abscheidungen mit PECVD sind zum Beispiel nicht völlig gleichmäßig. Es hängt nicht nur vom Zustand des Plasmas ab, sondern auch von der Flussverteilung der Präkursor-Gase. Manchmal wird es sogar auf der Rückseite des Substrats im Kanten-Bereich abgeschieden. Das Substrat ist in der Mikroelektronik meistens nicht isotrop, weil einkristalline Silizium-Wafer verwendet werden.

Guido Janssen und seine Gruppe hatten modifizierte Stoney-Formeln für Si (001) und Si (111) Substrat aufgrund von der Arbeit von William Nix [52] angegeben [49]. In der vorliegenden Promotionsarbeit wurde die mechanische Spannung in Dünnschicht auf Si (100) Wafern untersucht. Da die (100)- und (001)-Ebene von Si zu derselben äquivalenten Ebenengruppe gehören, ist die Formel für Si (001) Wafer ebenfalls einsetzbar für die vorliegende Promotionsarbeit. Die Formel für Si (001) Substrat lautet

$$\sigma_f = \frac{R_1 - R_2}{R_1 R_2} \frac{t_s^2}{t_f} 1,803 \times 10^{11} \text{ Pa}, \quad (3.27)$$

wobei der Wert  $1,803 \times 10^{11} \text{ Pa}$  dem numerischen Wert des biaxialen Moduls des Si (001) Substrats entspricht, und er die Anisotropie des Substrats berücksichtigt. In der vorliegenden Arbeit wurde für die Charakterisierung der Spannung der Dünnschicht ein Wafergeometrie-Messgerät der Firma Eichhorn & Hausmann verwendet. Die in dem Messgerät eingebettete Formel für die Spannungsrechnung entspricht Gleichung 3.27.

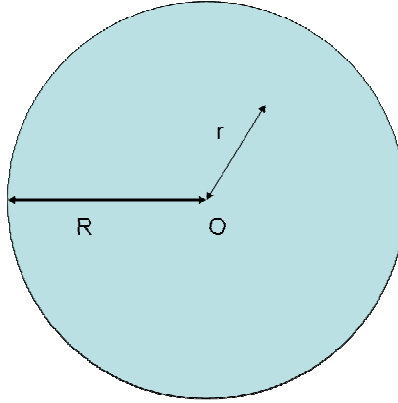
### 3.2.5 Membrandurchbiegung der kapazitiven Drucksensoren



**Abbildung 3.15:** Eine schematische Darstellung des Querschnitts eines kapazitiven Drucksensors.

Bei einer typischen Gestaltung des kapazitiven Drucksensors besteht eine Elektrode der Kapazität aus einer schwebenden Membran, deren Durchbiegung mit dem messbaren Druck variiert. In Abbildung 3.15 wird eine schematische Darstellung eines kapazitiven Drucksensors gezeigt. In dem geschlossenen Raum innerhalb der Druckdose herrscht ein Unterdruck ( $P_I$  in Abbildung 3.15), der als Referenz-Druck dient. Die Differenz zwischen dem inneren Druck  $P_I$  und dem äußeren Druck  $P_A$  erzeugt die Durchbiegung der Membran (der oberen Elektrode). Die Durchbiegung verändert sich mit der Variation des zu messenden äußeren Drucks  $P_A$ . Folglich wird der Abstand zwischen der oberen und unteren Elektroden verändert, und dadurch variiert auch die Kapazität der Druckdose. So wird ein Zusammenhang zwischen dem zum messenden Druck und der Kapazität gebildet.

Um die Variation der Kapazität eines kapazitiven Drucksensors zu beschreiben, muss zuerst die Durchbiegung der schwebenden Membran als Funktion des ausübenden Drucks dargestellt werden. Die analytische Beschreibung der Durchbiegung einer Membran wird aufgrund der elastischen Platten-Theorie [51] realisiert. Die Form der Membran eines kapazitiven Drucksensors ist normalerweise kreisförmig oder viereckig. Wenn die Durchbiegung solcher Membranen beschrieben werden muss, werden sie typischerweise als Platten mit befestigten Kanten unter gleichmäßiger Belastung betrachtet. Da in der vorliegenden Arbeit nur Drucksensoren mit kreisförmigen Membranen untersucht werden, werden folglich nur analytische Formeln für kreisförmige Membranen vorgestellt. Die entsprechenden Formeln für viereckige Membranen sind in [2] [51] zu finden.



**Abbildung 3.16:** Radius  $R$  einer kreisförmigen Membran und die Variable  $r$ .

Es wird zuerst angenommen, dass die Membran ohne Belastung ( $P_A = P_I$ ) ganz glatt ist. Wenn  $P_A \neq P_I$ , wird die Membran durch die Belastung gebogen. Jeder Punkt auf der Membran hat eine Positionsabweichung  $W$  im Bezug auf seine ursprüngliche Position (siehe Abbildung 3.15). Die Abweichung der auf einem Kreis liegenden Punkte, die mit einer Distanz  $r$  (Abbildung 3.16) von dem Zentrum der Membran entfernt sind, beträgt

$$W(r) = \frac{(P_A - P_I)}{64D} (R^2 - r^2)^2, \quad (3.28)$$

wobei  $R$  den Radius der Membran repräsentiert (Abbildung 3.15), und  $D$  die Biegesteifigkeit (*flexural rigidity*) der Membran ist. Die Biegesteifigkeit  $D$  ergibt sich mit

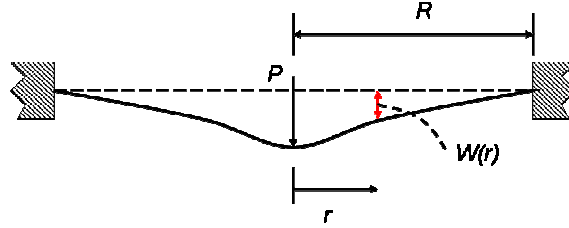
$$D = \frac{Y t_m^3}{12(1 - \nu^2)}, \quad (3.29)$$

wobei  $t_m$ ,  $Y$  und  $\nu$  entsprechend die Membrandicke, der Elastizitätsmodul und die Poissonzahl des Membranmaterials sind. Gemäß der Formel 3.28 wird die Abweichung des Zentrums der Membran, die auch als die zentrale Durchbiegung der Membran bezeichnet wird, berechnet mit

$$W(0) = \frac{(P_A - P_I)}{64D} R^4. \quad (3.30)$$

In dem Fall von kreisförmigen Platten mit eingespanntem Rand taucht bei der Durchbiegung der Platte die maximale mechanische Spannung am Rand der Platte auf. Die maximale mechanische Spannung berechnet sich zu

$$\sigma_{\max} = \frac{3}{4} \frac{(P_A - P_I) R^2}{t_m^2}. \quad (3.31)$$



**Abbildung 3.17:** Schematische Darstellung einer am Rand eingespannten Membran mit zentraler Belastung  $P$ .

Für eine maximale erlaubte Belastung der Druckdose kann die minimal erlaubte Dicke der Membran mit der Kenntnis der Bruchfestigkeit  $\sigma_f$  (*fracture strength*) des Membranen-Materials bestimmt werden. Zum Beispiel ist die Bruchfestigkeit von Silizium  $\sigma_r = 6.24 \times 10^8 \text{ dyn/cm}^2$  [53]. Für eine bestimmte maximale Belastung  $(P_A - P_I)_{\max}$ , beträgt dann die entsprechende minimale Dicke der Membran

$$t_{m,\min} = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{3(P_A - P_I)_{\max}}{\sigma_r}}. \quad (3.32)$$

Die Membran biegt sich unter Belastungen in einer konkaven Form. Die Kapazität zwischen den beiden Elektroden (Abbildung 3.15) kann mithilfe des Integrals errechnet werden:

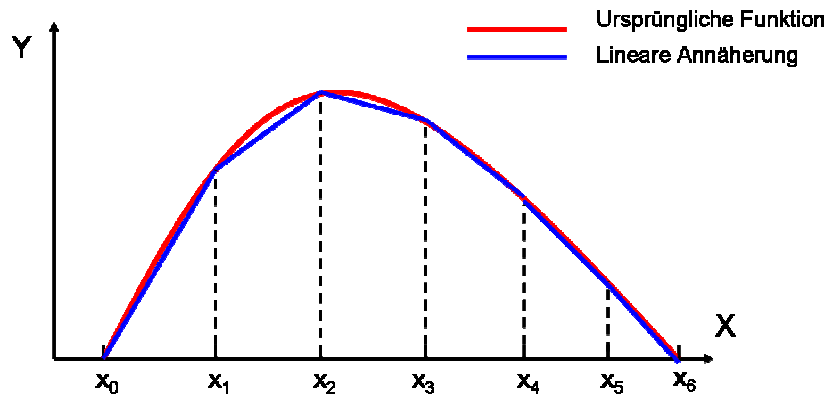
$$C_d = \int_0^a \frac{\varepsilon 2\pi r dr}{H - W(r)}, \quad (3.33)$$

wobei  $a$  der Radius der Elektrode ist (Abbildung 3.15),  $\varepsilon$  für die Permittivität des Innenraums der Druckdose steht und  $H$  der Abstand zwischen den beiden Elektroden bei Nullbelastung ist.

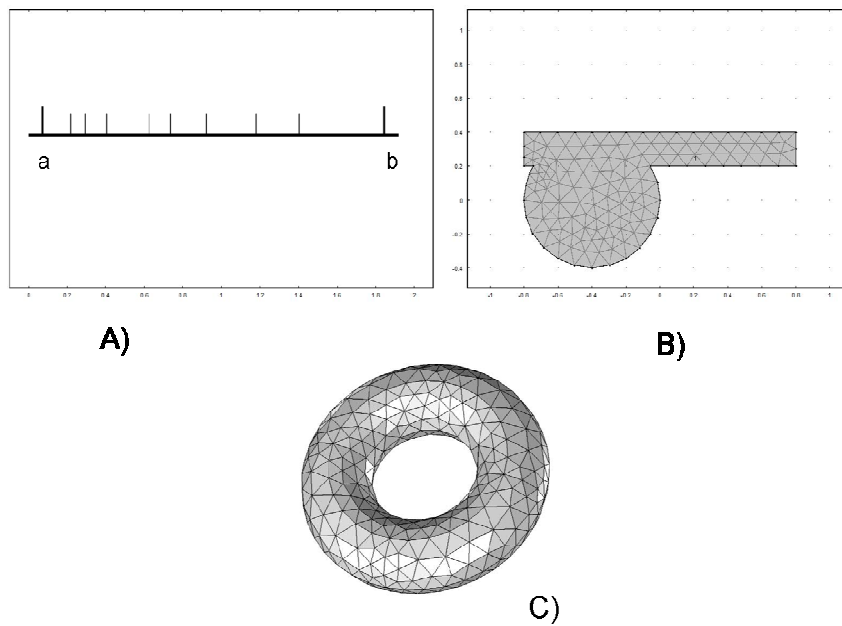
Wenn eine kreisförmige Platte mit dem befestigten Rand nur im Zentrum belastet wird (Abbildung 3.17), ergibt sich die Abweichung von den auf einem Ring liegenden Punkten, deren Abstand zum Zentrum  $r$  beträgt, zu

$$W(r) = \frac{r^2 P}{8\pi D} \ln \frac{r}{R} + \frac{P}{16\pi D} (R^2 - r^2), \quad (3.34)$$

wobei  $P$  für die Belastung steht und  $R$  den Radius der Membran repräsentiert.



**Abbildung 3.18:** Veranschaulichung einer Funktion, die durch stückweise lineare Funktionen genähert wird.



**Abbildung 3.19:** Diskretisierung in 1-dimensionalem A), 2-dimensionalem B) und 3-dimensionalem Fall C).

### 3.2.6 Charakterisierung der Membrandurchbiegung mit numerischen Methoden

Die Theorie von Platten mit befestigten Kanten ist manchmal nicht für die realistische Beschreibung der Membrandurchbiegung des kapazitiven Drucksensors geeignet, denn die Kanten der Membran sind in vielen Fällen nicht ideal befestigt. Außerdem findet bei den analytischen Formeln für die belastete Membran in Ka-

pitel 3.2.5 die Eigenspannung (*residual stress*) keine Berücksichtigung, die praktisch immer in der Membran vorhanden ist. Um das Verhalten realistischer Membranen unter Belastung zu beschreiben, werden oft numerische Methoden verwendet, z.B. die Finite-Elemente-Methode (FEM).

Die FEM ist eine Computer-unterstützte Methode, um annähernde Lösungen für die Differenzial- und Integralgleichungen zu bekommen, die die Reaktionen eines physikalischen Systems auf bestimmte äußere Einwirkungen vorhersagen.

Die FEM wird verwendet in der Festkörpermechanik, Wärmeübertragung, Strömungslehre, Akustik, Elektromagnetismus, und sogar in der Quantenmechanik, oder für die Analyse mit einer Kombination der genannten technischen Bereiche.

Die Differenzial- und Integralgleichungen, die das zu untersuchende System beschreiben, können meistens nur sehr mühsam oder überhaupt nicht mit analytischen Verfahren gelöst werden, insbesondere wenn die Form des von dem System genutzten Raums sehr kompliziert ist, wie zum Beispiel bei der Analyse der Deformierung eines Autos beim Frontalaufprall. Bei der Finite-Elemente-Methode wird der Raum, der von dem System besetzt wird, als Domäne (*domain*) bezeichnet. Wenn die Domäne in zahlreiche einfache Teilgebieten zerlegt, und gleichzeitig die ursprünglichen Differenzial- und Integralgleichungen durch einfache annähernde Gleichungen innerhalb der kleinen Teilgebieten ersetzt werden, wird die Analyse eine einfache Aufgabe für einen Computer, wobei zahlreiche einfache Gleichungen gelöst werden müssen. Um dieses Verfahren zu veranschaulichen ist in Abbildung 3.18 eine stückweise Annäherung einer eindimensionalen Funktion durch eine Serie von linearen Funktionen dargestellt.

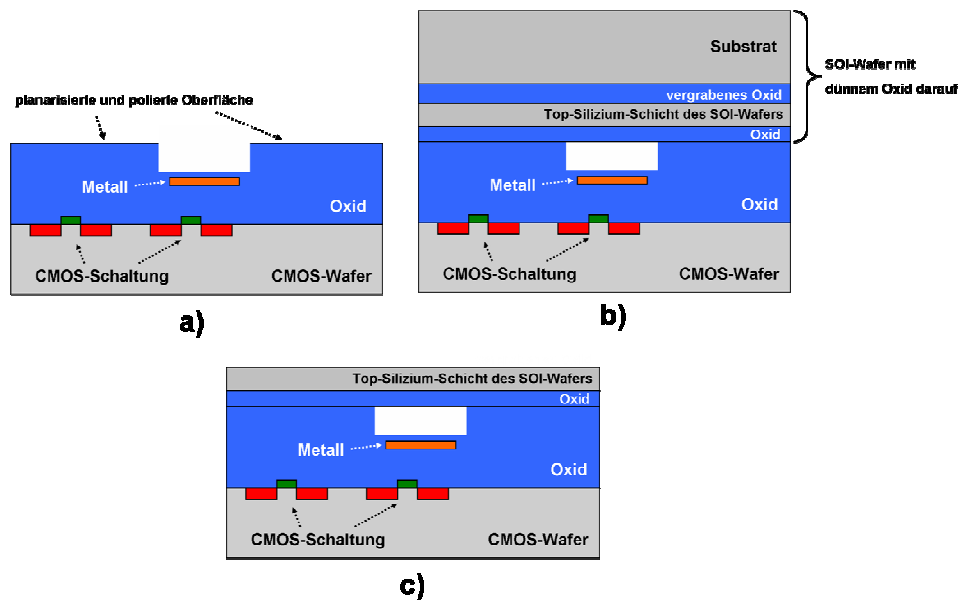
Die Zerlegung der Domäne in kleine einfache Teilgebiete, die so genannten Elemente, in endlicher (*finite*) Anzahl wird als Diskretisierung bezeichnet. Dabei gibt es keine Überlappungen oder Lücken zwischen den angrenzenden Elementen. Die Elemente im eindimensionalen Fall sind eindimensionale Intervalle. Im zwei- und dreidimensionalen Fall werden die Formen der Elemente möglichst einfach gewählt, wie zum Beispiel Dreiecke und Vierecke bei 2-D und Tetraeder und Pyramiden bei 3-D. Das ganze Muster der Elemente wird als Gitter (*mesh*) bezeichnet. In Abbildung 3.19 werden die Diskretisierungen im 1-D, 2-D und 3-D Fall beispielhaft präsentiert, wobei die Elemente in 2-D und 3-D Fall entsprechend Dreiecke und Tetraeder sind. Je dichter die Elemente sind, desto genauer ist die Approximation.

Wenn ein Programm für eine FEM-Analyse entwickelt werden soll, müssen dabei die Näherungsgleichungen geeignet formuliert werden. Allerdings können auch viele verschiedene kommerzielle Programme verwendet werden, bei denen die geeigneten mathematischen Umformulierungen aufgrund von speziellen Aufgaben bereits integriert sind. Beim Letzteren wird der Aufwand für die FEM-Analyse auf



wenige Schritte reduziert: Konstruktion der Geometrie des Systems, Angabe von Materialeigenschaften, Definition von Randbedingungen und Belastungen, Auswahl der gewünschten physikalischen Analyse, Eingabe von benötigten Parametern und Auswahl erwünschter Darstellungen der Ergebnisse.

## 4 Vergleich der verschiedenen Integrationskonzepte eines Post-CMOS-Drucksensors



**Abbildung 4.1:** Grober Ablauf der Integration der Druckdose mit der CMOS-Schaltung durch plasma-aktiviertes Wafer-Bonden.

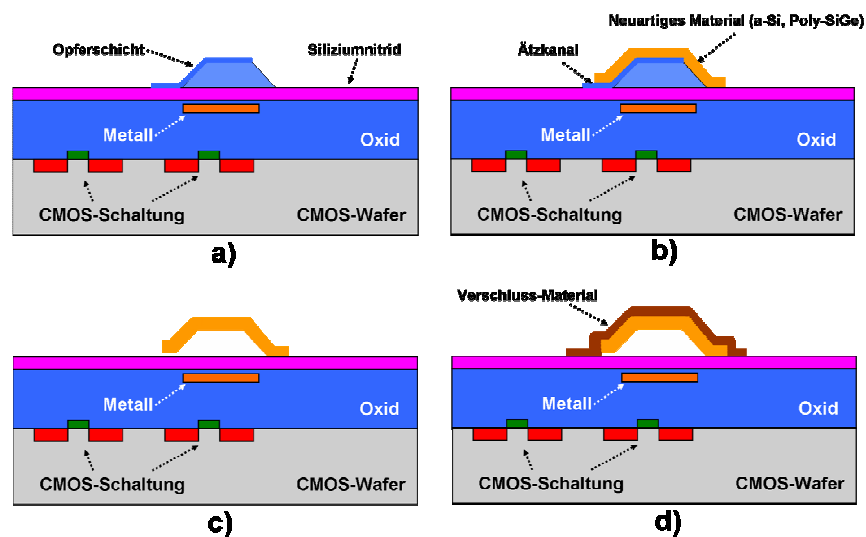
In dieser Arbeit wurde die Post-CMOS-Integration für die Integration der Druckdose mit CMOS-Schaltung gewählt. Verschiedene Konzepte wurden überlegt und verglichen. Diese Konzepte können in zwei Kategorien unterteilt werden,

1. Integration, basierend auf dem plasma-aktivierten Wafer-Bonden von zwei Wafern.
2. Integration, basierend auf dem Einsatz niedertemperatur-abscheidbarer Materialien für die Druckdosen-Membran. Es wurde dazu drei Materialien ausgetestet, amorphes Silizium (a-Si), polykristallines Silizium-Germanium (Poly-SiGe) und polykristallines Germanium (Poly-Ge).

Abbildung 4.1 zeigt den groben Ablauf des Integrationsprozesses mit plasma-aktiviertem Wafer-Bonden. Die Kavität des Druckdoseninnenraums entsteht dabei durch das plasma-aktivierte Wafer Bonden von zwei Wafer. Einer ist der Wafer mit CMOS Schaltung, und der anderen ist ein SOI Wafer mit einer dünnen Oxid-Schicht auf dem Wafer. In Abbildung 4.1 a) ist der Querschnitt des CMOS Wafers schematisch dargestellt. Auf dem Wafer wird eine dicke Oxid-Schicht abgeschieden, in der Metall-Pads eingebettet werden, die als feste Elektroden der Druckdosen dienen. Über den Metall-Pads werden Kavitäten im Oxid geätzt. Die Oberfläche des Oxides wird planarisiert und poliert, da eine gute Planarität und eine gute Rauigkeit der Bond-Grenzflächen für das plasma-aktivierte Wafer Bonden vor-

ausgesetzt ist. Die Oxid-Schicht auf dem SOI-Wafer wird ebenfalls planarisiert und poliert. Laut der Arbeit von U. Gösele und seiner Gruppe können eine dünne Oxid-Schicht auf einem zu bondenden Wafer und eine dicke Oxid-Schicht auf dem anderen zur stärksten Verbindung führen [54]. Deshalb wird auch hier diese Variante herangezogen. Der CMOS-Wafer und SOI-Wafer werden in Vakuum mit plasma-aktiviertem Wafer-Bonden gebondet (Abbildung 4.1 b)). Nach dem Bonden werden das Substrat und das vergrabene Oxid des SOI-Wafers entfernt (Abbildung 4.1 c)).

Die Vorteile des plasma-aktivierten Wafer Bondens sind niedrige Prozess-Temperatur (bis Raumtemperatur) und inhärente Sauberkeit. Der Hauptnachteil ist die hohe Anforderung an die Planarität und Sauberkeit der Bond-Grenzflächen.



**Abbildung 4.2:** Grober Ablauf der Integration der Druckdose mit der CMOS Schaltung, die durch die Herstellung der Druckdose mit der Oberflächen-Mikromechanik-Technologie nach dem CMOS-Prozess realisiert wird.

Außer den auf Wafer-Bonden basierenden Konzepten wurden auch Konzepte, die auf der Oberflächen-Mikromechanik-Herstellung der Druckdose über der fertigen CMOS-Schaltung basieren, überlegt. Dabei wird der Einsatz von neuartigen Membran-Materialien, die bei CMOS-kompatibler Temperatur abgeschieden werden können, geplant. Da a-Si und Poly-SiGe/Ge bei Temperatur niedriger als 450°C abgeschieden werden können, wurden die beiden Materialien als das Membran-Material gewählt. Abbildung 4.2 zeigt den Ablauf des Integrationsprozesses. Nach der Fertigung der CMOS-Schaltung wird auf dem CMOS Wafer eine strukturierte Opferschicht erzeugt (Abbildung 4.2 a)). Danach wird das Membranmaterial auf dem Wafer abgeschieden und strukturiert. Anschließend wird die Opferschicht entfernt. So entsteht die offene Membran über dem Wafer

(Abbildung 4.2 c)). Am Ende wird eine Verschluss-Schicht auf der Membran abgeschieden, um die Druckdose zu verschließen (Abbildung 4.2 d)).

Im Vergleich mit dem Konzept des Wafer-Bondens ist das Konzept mit der Oberflächen-Mikromechanik-Herstellung der Druckdose über der CMOS-Schaltung kostengünstiger, da kein weiterer Wafer benötigt wird. Allerdings müssen die Abscheidung und die Eigenschaften der neuartigen Materialien untersucht werden. Außerdem gibt es in dieser Membran immer bestimmte Eigenspannungen, während bei den Bond-Konzepten fast spannungsfreie einkristalline Silizium-Membranen eingesetzt werden können. Darüber hinaus muss beim a-Si-Konzept eine elektrisch leitende Schicht in dem a-Si eingebettet werden, was das Konzept kompliziert.

Jedes der oben beschriebenen Konzepte hat sowohl Vor- als auch Nachteile. In dieser Arbeit werden diese Konzepte experimentell untersucht.

## 5 PECVD-Abscheidung von SiGe- und Ge-Schichten

Am Fraunhofer IMS wurde ein Prozess für kapazitive Drucksensoren mit Poly-Silizium als Membran-Material entwickelt, und die ausgezeichneten mechanischen Eigenschaften und die Langzeitstabilität des Poly-Siliziums wurden durch die industrielle Produktion und die Forschungen an den auf Poly-Silizium basierenden Drucksensoren verifiziert und bewiesen. Trotz der exzellenten Eigenschaften des Poly-Siliziums verhindern die hohen Temperaturen, die für die Kristallisation und die Aktivierung der Ionen-Implantation des Poly-Siliziums benötigt werden, die Verwendung des Poly-Siliziums für die Post-CMOS Integration von Druckdosen.

Ein Germanium-Atom besitzt wie ein Silizium-Atom auch 4 Valenzelektronen, und das Germanium kann mit Silizium zusammen eine Diamant-Kristallstruktur bilden, d.h., dass die Germanium Atome die Silizium Atome im Kristall-Gitter ersetzen können. Die Sprungtemperatur vom amorphen zum kristallinen Zustand des Germaniums ist viel niedriger als die des Siliziums, und folglich kann die Formation von Poly-SiGe bei viel niedrigeren Temperaturen als die des Poly-Siliziums realisiert werden. Je größer der Germanium-Anteil ist, desto niedriger ist die Abscheidetemperatur. Im Rahmen der vorliegenden Promotionsarbeit wurden Poly-SiGe Schichten mit einem Ge-Anteil von circa 80% bei einer Substrat-Temperatur von circa 380°C mit PECVD produziert, und sie sind völlig geeignet für die Post-CMOS Integration von MEMS, inklusive Drucksensoren, über den CMOS-Schaltungen, die mit einem Standard 0,35µm CMOS-Prozess hergestellt werden. Sherif Sedky [29] stellt fest, dass das thermische Budget für die Post-CMOS Integration von MEMS mit einem Standard 0,35µm CMOS Prozess ungefähr bei 520°C für 90min liegt. Dieser Wert wird bei allen in dieser Arbeit vorgestellten Strukturen unterschritten.

Als ein polykristallines Material besitzt Poly-SiGe vergleichbare mechanische Eigenschaften wie Poly-Si. Außerdem kann Poly-SiGe während der Abscheidung in situ dotiert werden, und es werden keine zusätzlichen Implantations- und Aktivierungs-Schritte benötigt, wie diese Arbeit zeigte.

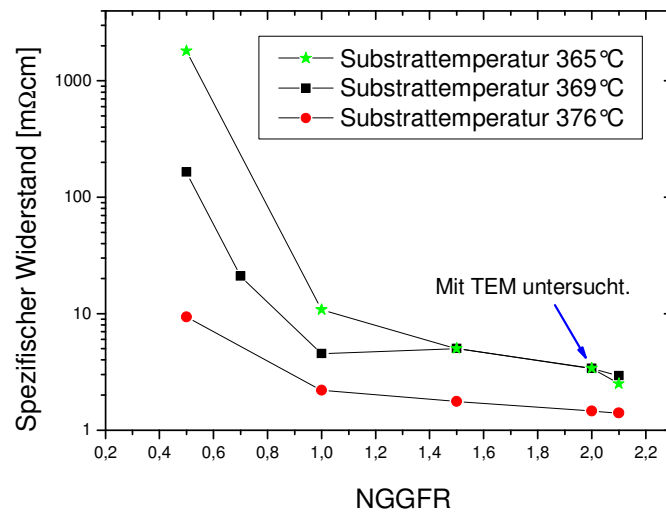
Im Rahmen dieser Arbeit wurden polykristalline und amorphe SiGe- und Ge-Schichten mit dem Precision 5000 Kalt-Wand-CVD-System von Applied Materials mit PECVD- beziehungsweise CVD-Verfahren abgeschieden. Die Versuche in dieser Arbeit wurden auf 8-Zoll Wafern durchgeführt. Die RF(*radio frequency*) Frequenz des betreibenden elektrischen Signals für die PECVD Abscheidung war 13,56MHz.

Als Silizium-Gasquelle wurde reines Monosilan ( $\text{SiH}_4$ ) verwendet, während für Germanium reines Monogerman ( $\text{GeH}_4$ ) eingesetzt wurde. Für p- und n-Dotierung wurden entsprechend 5% Diboran ( $\text{B}_2\text{H}_6$ ) in Argon und 5% Monophosphan ( $\text{PH}_3$ ) in Argon verwendet. Diese Prozessgase wurden bei der Abscheidung der Schichten verdünnt mit Argon-Gas. Wenn es nicht besonders angegeben wird, lautet das Verhältnis der Gasflussraten für die SiGe Abscheidungen 208 : 150 : 2365 : 5 („das ursprüngliche SiGe Verhältnis“, USGV) entsprechend für die Flussrate von  $\text{GeH}_4$ ,  $\text{SiH}_4$ , Ar und  $\text{B}_2\text{H}_6$  (oder  $\text{PH}_3$  für das n-dotierte Material). Für das dotierte Ge beträgt das Verhältnis, wenn es nicht besonders angegeben wird, 208 : 2361 : 5 („das ursprüngliche Ge Verhältnis“, UGV) entsprechend für  $\text{GeH}_4$ , Ar und  $\text{B}_2\text{H}_6$ . Die Germanium-Schichten wurden nur mit p-Dotierung abgeschieden.

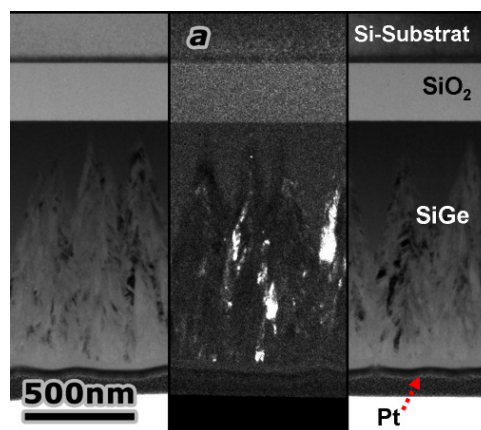
### 5.1 PECVD-Abscheidung von bor-dotierten SiGe-Schichten mit erhöhten gesamten Gasflussraten

Um die Auswirkung der Variation der gesamten Flussrate der Prozessgasen auf die Filmeigenschaften der abgeschiedenen Poly-SiGe Schichten zu untersuchen, wurden p-dotiertes PECVD Poly-SiGe auf PECVD  $\text{SiO}_2$ , das vorher auf dem Silizium Substrat erzeugt wurde, abgeschieden. Bei der Abscheidung betrug der Elektrodenabstand 300mil (7,62mm), und die Plasma-Leistung war 66W. Abscheidungen wurden bei einem Kammer-Druck von 2Torr durchgeführt. Die Gaszusammensetzung entsprach USGV.

Bei der Abscheidung wurde die gesamte Flussrate der Prozessgase variiert, während das Gas-Verhältnis und alle anderen Parameter konstant blieben. In Abbildung 5.1 wird der Zusammenhang zwischen dem Spezifischen Widerstand der abgeschiedenen Poly-SiGe-Schicht und der gesamten Gasflussrate dargestellt, wobei die gesamte Gasflussrate auf 1364sccm normalisiert wird. Zum Vereinfachen wird NGGFR als  $\text{NGGFR} = (\text{gesamte Gasflussrate}) / (1364\text{sccm})$  definiert. Die Poly-SiGe Schichten wurden bei der Substrat-Temperatur von 365°C, 369°C und 376°C abgeschieden. Es ist zu erkennen, dass der spezifische Widerstand der Schicht mit steigendem gesamtem Gasfluss sinkt. Weil der Diboran-Anteil in der gesamten Gasflussrate konstant blieb, wird angenommen, dass die Dotierstoffkonzentration der abgeschiedenen Schichten konstant ist. Der spezifische Widerstand reflektiert dann den Kristallisationsgrad der Schichten, und je kleiner der spezifische Widerstand ist, desto besser ist die Schicht kristallisiert. Die Charakterisierung der Kristallisation der Schichten mit Hilfe des spezifischen Widerstandes der Schichten ist ein üblicher Ansatz in der Forschung der SiGe Abscheidung [55] [56] [57].



**Abbildung 5.1:** Spezifischer Widerstand der abgeschiedenen Poly-SiGe Schicht in Abhängigkeit von NGGFR.

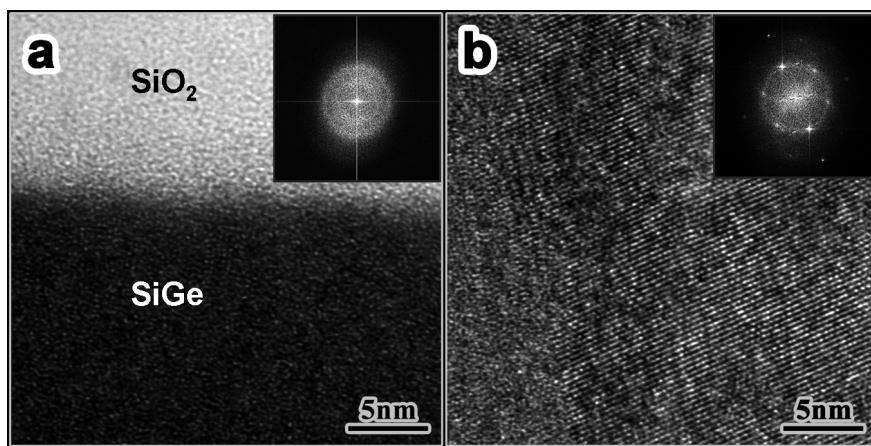


**Abbildung 5.2:** Hellfeld- und Dunkelfeld-Abbildung (Einblendung a) einer TEM Untersuchung an der SiGe-Schicht, die bei einer Substrattemperatur von 369°C und NGGFR=2,0 abgeschieden wurde (dieselbe Schicht wird auch in Abbildung 5.1 dargestellt). Von oben nach unten sieht man das Si-Substrat, SiO<sub>2</sub>, die SiGe Schicht und die Pt Schicht zum Schutz der Probe bei der TEM Untersuchung.

Der absinkende spezifische Widerstand spiegelt den besseren Kristallisationsgrad der entsprechenden Schicht wieder. In Abbildung 5.1 wird gezeigt, dass der Kristallisationsgrad der SiGe Schicht mit dem zunehmenden gesamten Gasfluss steigt.

Um die Kristallinität der abgeschiedenen Schicht nachzuweisen, wurde eine TEM (*transmission electron microscopy*) Untersuchung an einer der SiGe-Schichten durchgeführt, die in Abbildung 5.1 zusammengefasst dargestellt werden. Die

Schicht wurde bei einer Substrattemperatur von 369°C und NGGFR=2,0 in 180s abgeschieden. In Abbildung 5.2 sind eine Hellfeld- und eine Dunkelfeld-Aufnahme von der TEM Untersuchung dargestellt. Viele große kegelförmige Kristalle sind in der SiGe Schicht zu beobachten. In der Einblendung a) der Abbildung 5.2 ist die Dunkelfeld Aufnahme zu finden. Die hellen Bereiche in der Dunkelfeld-Aufnahme wurden durch die von Kristall-Gitter gebeugten Elektronen gebildet, und deswegen dienen diese ebenfalls dem Nachweis für die Kristallinität der Schicht. Es ist zu erkennen, dass bei den vorliegenden Depositionsparametern die SiGe Schicht am Anfang der Abscheidung amorph wächst, und nach circa 50nm die großen kegelförmigen Kristalle beginnen, aus kleinen Kristall-Keimen sich zu bilden.



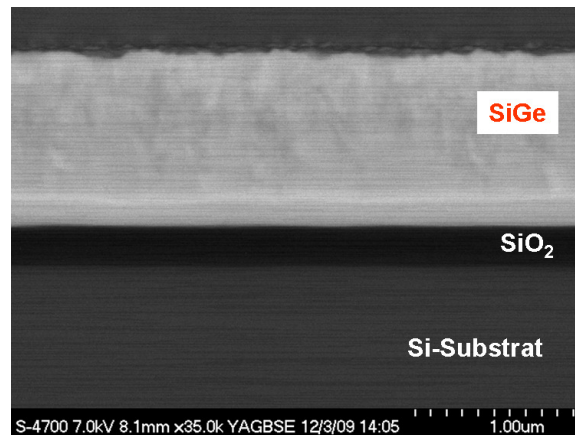
**Abbildung 5.3:** HRTEM (high-resolution TEM) Aufnahmen an der SiO<sub>2</sub>-SiGe Grenze (a) und an der Grenze zwischen dem amorphem und dem kristallinen Gebiet (b) der SiGe Schicht. Die jeweiligen Einblendungen sind die Elektronenbeugungsbilder.

In Abbildung 5.3 werden zwei HRTEM (*high-resolution* TEM) Aufnahmen der TEM Untersuchung gezeigt. Bei der HRTEM Aufnahme der Grenze zwischen SiO<sub>2</sub> und SiGe (siehe auch Abbildung 5.2) wurde keine Kristalle beobachtet. In der HRTEM Aufnahme der Grenze zwischen amorphem und kristallinem Gebiet der Schicht (siehe auch Abbildung 5.2) sind die Netzebene des Kristalls deutlich zu erkennen.

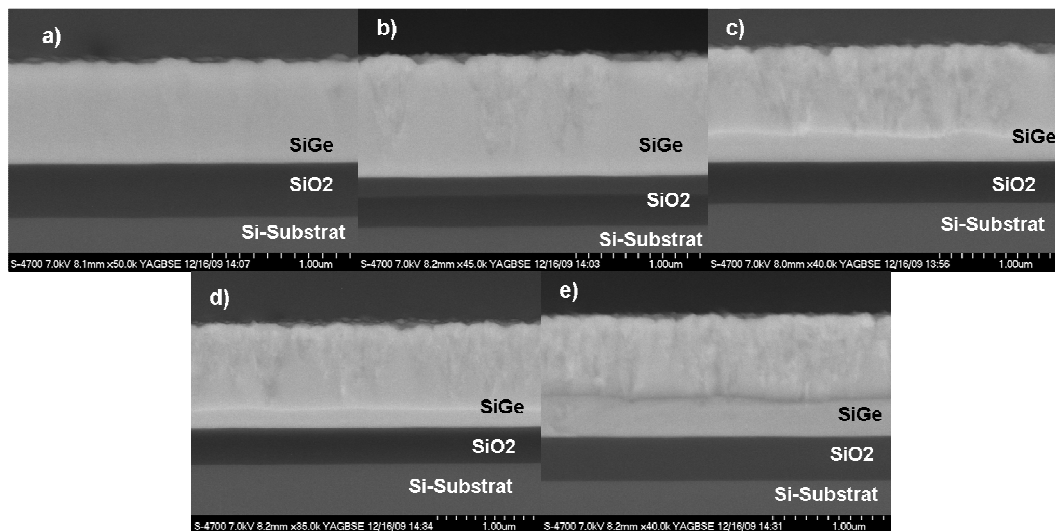
In Abbildung 5.4 wird eine REM (Rasterelektronenmikroskop) Aufnahme des beim TEM untersuchten Films dargestellt. Mit der REM Aufnahme können auch die kegelförmigen Kristalle in der SiGe Schicht beobachtet werden. Mit dem Vergleich von Abbildung 5.2 mit Abbildung 5.4 ist zu erkennen, dass man unter den Abscheidungsbedingungen der SiGe-Schichten in dieser Arbeit die Kristallinität der Schichten mit der REM Aufnahme erkennen kann. In Abbildung 5.5 werden die REM Aufnahmen der SiGe Schichten dargestellt, die mit verschiedenen gesamten Gasflüssen bei einer Substrat-Temperatur von 365°C abgeschieden wurden. Die spezifischen Widerstände dieser Schichten werden auch in Abbildung 5.1 ge-



zeigt. Man sieht in den REM Aufnahmen, dass in der SiGe Schicht mit NGGFR=0,5 (Abbildung 5.5 a)) keine Kristalle zu beobachten sind, d.h., diese Schicht ist amorph. Mit erhöhten gesamten Gasflussraten vermehren sich die Kristalle in der SiGe Schicht, und in der Schicht mit der maximalen gesamten Flussrate, nämlich NGGFR=2,1 (Abbildung 5,5 e)), können die meisten Kristalle gesehen werden.



**Abbildung 5.4:** REM (Rasterelektronenmikroskop) Aufnahme der SiGe Schicht, die auch mittels TEM untersucht wurde.



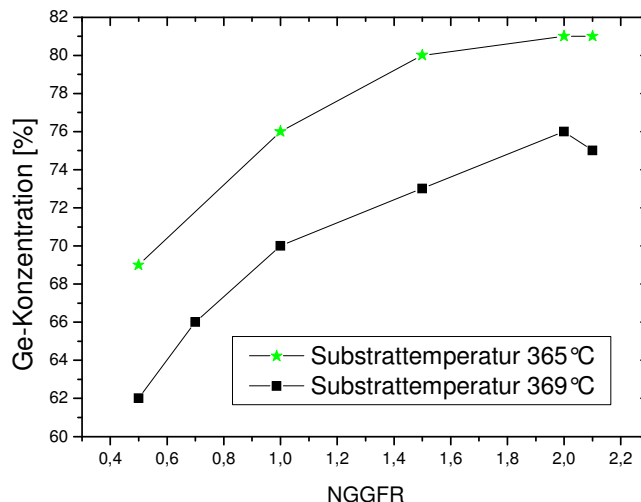
**Abbildung 5.5:** REM Aufnahmen der SiGe Schichten, die bei einer Substrat-Temperatur von 365°C mit NGGFR=0,5 a), 1,0 b), 1,5 c), 2,0 d) und 2,1 e) abgeschieden wurden.

Über die Analyse des spezifischen Widerstandes (Abbildung 5.1) und der REM Aufnahmen der Schichten kann verifiziert werden, dass die abgeschiedenen SiGe-Schichten vom amorphen zum polykristallinen Zustand, alleine durch die Erhö-

hung der gesamten Gasflussrate wechseln können. Die Ursachen für dieses Phänomen werden in Abschnitt 5.2 diskutiert.

### 5.1.1 Einfluss der gesamten Gasflussrate auf die Ge-Konzentration der SiGe Schicht

Die Ge-Konzentration der SiGe-Schichten, die bei einer Substrattemperatur von 365°C und 369°C abgeschieden wurden, wurden durch EDX (Energiedispersive Röntgenspektroskopie) analysiert. In Abbildung 5.6 werden die Ge-Konzentrationen der SiGe-Schichten gegen die gesamten Gasflussraten bei der Abscheidung eingetragen. Die Ge-Konzentration der SiGe-Schicht steigt mit der zunehmenden gesamten Gasflussrate. Bei  $NGGFR \approx 2,0$  geht der Anstieg der Ge-Konzentration in die Sättigung. Die Ursache für dieses Phänomen wird in Abschnitt 5.2 diskutiert.

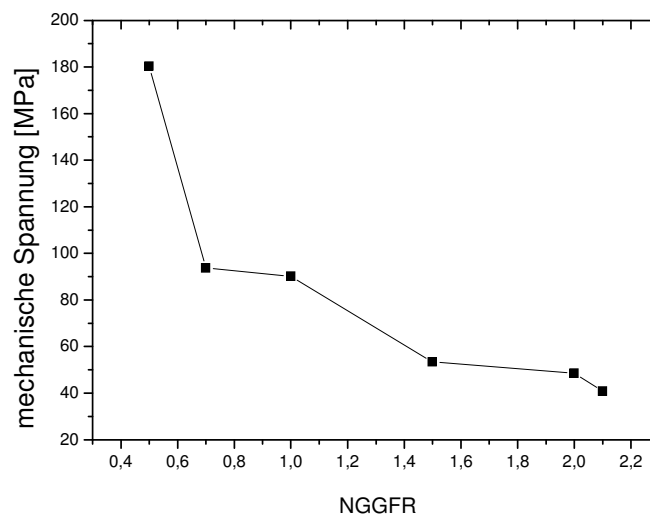


**Abbildung 5.6:** Der Zusammenhang zwischen der Ge-Konzentration der SiGe-Schichten und der gesamten Gasflussrate bei der Abscheidung. Die Schichten wurden bei der Substrattemperatur von 365°C und 369°C abgeschieden. Die Gaszusammensetzung entsprach USGV, und die elektrische Leistung betrug 66W.

### 5.1.2 Einfluss der gesamten Gasflussrate auf die mechanische Spannung der SiGe Schicht

Die mechanische Spannung der SiGe-Schicht, die bei einer Substrat-Temperatur von 369°C abgeschieden wurde, wurde durch die Messung der Wafer-Verbiegung vor und nach der Abscheidung an einem MX 208 Wafer-Geometrie-Messgerät von der Firma Eichhorn & Hausmann charakterisiert. In Abbildung 5.7 wird die mechanische Spannung der SiGe-Schicht gegen die gesamte Gasflussrate aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass die SiGe Schicht Zugspannung besitzt. Die Zug-

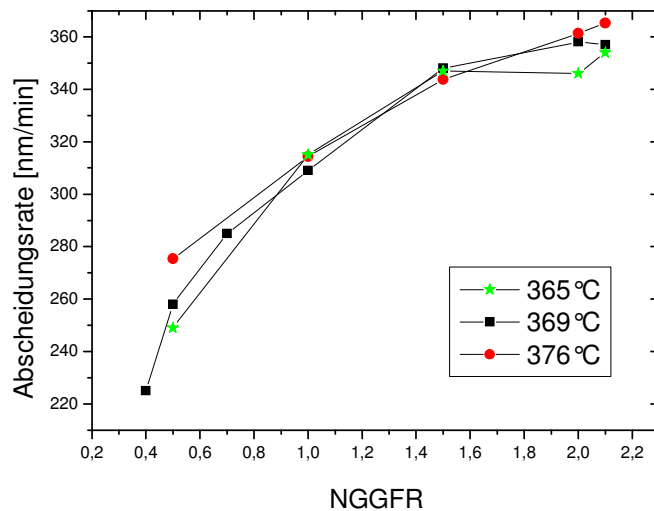
spannung der Schicht nimmt mit steigendem gesamtem Gasfluss ab. Während die Zugspannung der Schicht bei NGGFR=0,5 180MPa beträgt, sinkt die Zugspannung der Schicht bei NGGFR=2,1 bis zu circa 30MPa. Mit der Charakterisierung des spezifischen Widerstandes der Schichten (Abbildung 5.1), ist zu erkennen, dass der kleinste spezifische Widerstand und die kleinste mechanische Spannung gleichzeitig bei maximalem gesamtem Gasfluss auftreten. Solch eine Kombination einer kleinen spezifischen Widerstand und einer kleinen mechanischen Spannung ist bei vielen MEMS-Anwendungen erwünscht.



**Abbildung 5.7:** Die Abhängigkeit der mechanischen Spannung von der gesamten Gasflussrate bei der Abscheidung. Die Schichten wurden bei der Substrat-Temperatur von 369°C abgeschieden. Die Gaszusammensetzung entsprach USGV und die elektrische Leistung betrug 66W.

### 5.1.3 Einfluss der gesamten Gasflussrate auf die Abscheidungsrate der SiGe Schicht

Die Dicke der abgeschiedenen Schichten wurde mithilfe des REM gemessen, und anhand der Dicke wurde die Abscheiderate bei den verschiedenen gesamten Gasflussraten ausgerechnet. In Abbildung 5.8 wird die Abscheidungsrate der SiGe Schichten in Abhängigkeit zur gesamten Gasflussrate dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Abscheidungsrate mit der wachsenden gesamten Gasflussrate steigt. Die Abscheiderate bei NGGFR=2,1 ist circa 100nm/min höher als die bei NGGFR=0,5. Die Abscheidungstemperatur hatte fast keine Auswirkung auf die Abscheidungsrate. Die Tatsache, dass die Abscheidungsrate mit der Zunahme der gesamten Gasflussrate zunahm und nicht von der Substrat-Temperatur abhängig war, deutet an, dass das Wachstum der Schicht von der Zulieferung der schichtbildenden Teilchen, aber nicht von der Oberflächen-Reaktion der wachsenden Schicht begrenzt wurde.



**Abbildung 5.8:** Die Abhängigkeit der Abscheiderate der SiGe Schicht von der gesamten Gasflussrate bei der Abscheidung. Die Schichten wurden bei einer Substrattemperatur von 365°C, 369°C und 376°C abgeschieden. Die Gaszusammensetzung entsprach USGV und die elektrische Leistung betrug 66W.

## 5.2 Erklärung für die durch erhöhten gesamten Gasfluss verursachte Kristallinität

In diesem Abschnitt werden zuerst die Mechanismen der durch erhöhten gesamten Gasfluss verursachten Kristallinität vorgestellt und nachgewiesen. Am Ende wird die Bedeutung dieses Phänomens der durch erhöhten gesamten Gasfluss verursachten Kristallinität dargestellt.

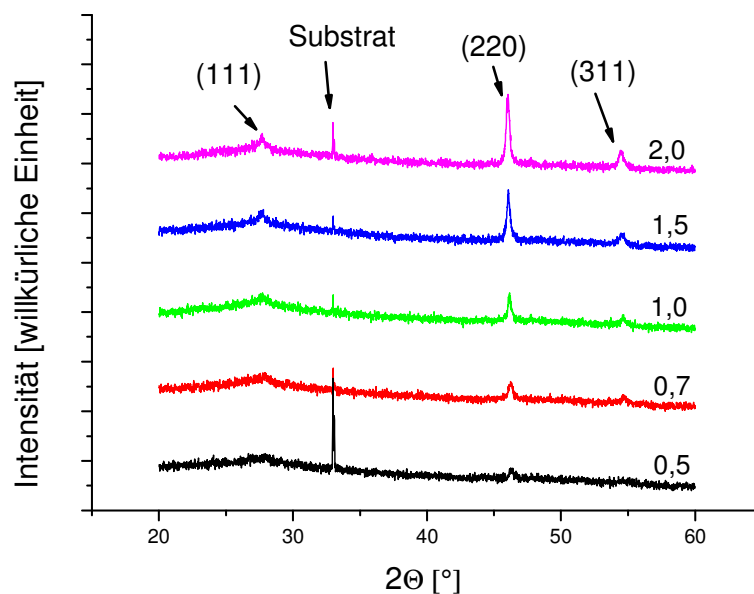
### 5.2.1 Mechanismen für die durch erhöhten gesamten Gasfluss verursachte Kristallinität

In Abschnitt 5.1 wird gezeigt, dass die SiGe-Schicht von dem amorphen Bereich in den poly-kristallinen Bereich durch Erhöhung der gesamten Gasflussrate gelangen kann. Dieses Phänomen kann auf die durch den erhöhten gesamten Gasfluss reduzierte Verweilzeit der Gasteilchen zurückgeführt werden. Die reduzierte Verweilzeit könnte durch zwei Mechanismen die Kristallinität der abgeschiedenen Schicht verbessern.

1. Die reduzierte Verweilzeit der Gasteilchen verursacht die Zunahme der Ge-Konzentration in der SiGe-Schicht. Wegen der niedrigeren amorph-kristallinen Sprungtemperatur des Germaniums wird die Kristallisationstemperatur der SiGe-Schicht reduziert.
2. Die verkürzte Verweilzeit könnte dazu führen, dass das Verhältnis von  $\text{XH}_3$  zu  $\text{XH}_2$  ( $\text{X}=\text{Si}$  oder  $\text{Ge}$ ) im Plasma vergrößert wird. Damit gelangen mehr  $\text{XH}_3$ -

Radikale an die Oberfläche. Die Oberflächen-Beweglichkeit von  $\text{XH}_3$  ist größer als diejenige von  $\text{XH}_2$  [58][59][60]. Radikale mit größerer Oberflächen-Beweglichkeit begünstigen die polykristalline Abscheidung der Schicht [61][62].

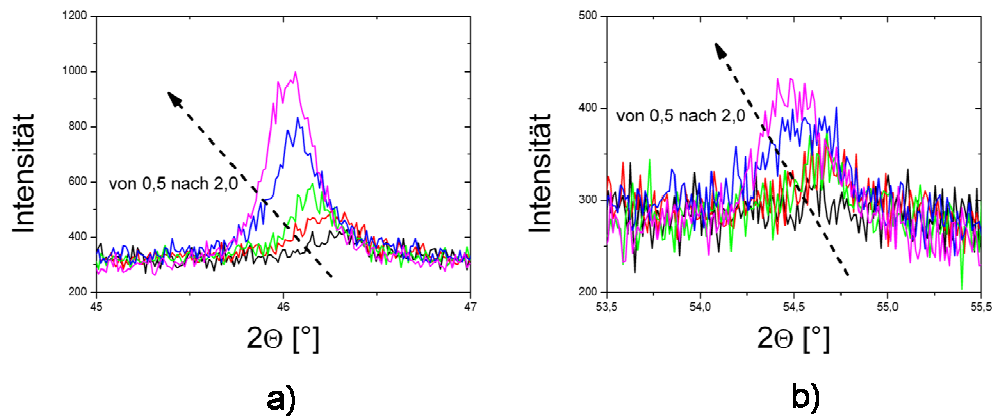
Nachfolgend werden die zwei Mechanismen erklärt und/oder nachgewiesen. In Abschnitt 5.1.1 wird gezeigt, dass die Ge-Konzentration der SiGe-Schicht mit der Erhöhung des gesamten Gasflusses steigt. Diese Tatsache wurde auch mit der XRD (*X-Ray Diffraction*)-Analyse an den SiGe-Schichten verifiziert. Die XRD-Analyse wurde an den SiGe-Schichten durchgeführt, die mit NGGFR=0,5, 0,7, 1,0 1,5 und 2,0 bei einer Substrat-Temperatur von 369°C abgeschieden wurden, wobei die elektrische Leistung 66W betrug. Die Depositionsparameter sind gleich denen der entsprechenden Schichten in Abbildung 5.1. Diese Schichten wurden auf USG (undotiertes Silikatglas) von 500nm abgeschieden, das vorab auf 8-Zoll Wafer mit dem PECVD-Verfahren abgeschieden wurde. Der Nennwert der Dicke der SiGe-Schichten war 750nm. Die Wellenlänge der eingesetzten Röntgenstrahlung  $\lambda$  ist 1,54056Å.



**Abbildung 5.9:** XRD Kurven, die an den SiGe Schichten aufgenommen wurden, die mit NGGFR=0,5, 0,7, 1,0, 1,5 und 2,0, und einer Substrat-Temperatur von 369°C und einer elektrischen Leistung von 66W abgeschieden wurden.

Abbildung 5.9 zeigt die XRD-Kurven, die an den SiGe-Schichten aufgenommen wurden. Um sie besser zu veranschaulichen, werden die Kurven mit manuellen Achsversetzungen entlang der „Intensität“-Achse dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die mit NGGFR=0,5 abgeschiedene Schicht amorph ist. Mit der zunehmen-

den gesamten Gasflussrate wird die Schicht mehr und mehr kristallin, und die Schicht bei NGGFR=2,0 zeigt die besten Kristallinität. In den XRD Kurven ist zu sehen, dass die am deutlichsten reflektierten Signale von der Netzebene (111), (220) und (311) stammen. Mit dieser XRD Analyse wurde noch einmal bestätigt, dass die Ausbildung von amorphem und kristallinem Material in diesem Fall vom gesamten Gasfluss abhängig ist. Die Erhöhung des gesamten Gasflusses führt hierbei vermehrt zur Kristallbildung.



**Abbildung 5.10:** Vergrößerung der Kurven in Abbildung 5.9 bei  $2\theta$ -Winkel von  $46^\circ$  a) und  $54^\circ$  b).

Es ist noch in Abbildung 5.9 zu erkennen, dass mit zunehmendem Gasfluss die Peaks der Netzebenen von (111), (220) und (311) in negativer Richtung der  $2\theta$ -Achse verschoben wird. In Abbildung 5.10 wird die Vergrößerung der in Abbildung 5.9 gezeigten Kurven bei dem  $2\theta$ -Winkel von  $46^\circ$  und  $54^\circ$  dargestellt, wobei keine Achsversetzung entlang Intensität-Achse eingesetzt wird. Der  $2\theta$ -Winkel von  $46^\circ$  entspricht der Netzebene (220) und der  $2\theta$ -Winkel von  $54^\circ$  repräsentiert die Netzebene (311). Der (220) Peak der Schicht mit NGGFR=0,7 liegt bei circa  $46,3^\circ$ , während der der Schicht mit NGGFR=2,0 bei  $46,0^\circ$  liegt. Dieser Unterschied deutet an, dass der Netzebenen-Abstand von den Netzebenen (220), der mit niedrigerer gesamter Gasflussrate abgeschiedenen Schicht, kleiner ist, als derjenige der mit höherer gesamter Gasflussrate abgeschiedenen Schicht.

Mit der Bragg-Gleichung [63] kann der Abstand der Netzebenen (220) der Schicht mit NGGFR=2,0 errechnet werden:

$$d_{(220-2,0)} = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} = \frac{1,54056 \text{ \AA}}{2 * 0,3907} = 1,9715 \text{ \AA}. \quad (5.1)$$

Auf dieselbe Weise wird der Abstand der Netzebenen (220) der Schicht mit NGGFR=0,7 zu  $d_{(220\_0,7)} = 1,9593\text{\AA}$  errechnet. Der Atomradius von Silizium ist 111pm, während der Atomradius von Germanium 125pm beträgt. Der größere Netzebenen-Abstand deutet deswegen den größeren Ge-Anteil im Kristall-Gitter an. Der Ge-Anteil in der Schicht kann auch anhand von der Gitterkonstante der Kristalle abgeschätzt werden.

Die Gitterkonstante der Kristalle in der Schicht mit NGGFR=2,0  $a_{(2,0)}$  kann anhand des Netzebenen-Abstandes der Netzebenen (220)  $d_{(220\_2,0)}$  ausgerechnet werden [64]:

$$a_{(2,0)} = d_{(220\_2,0)} \times \sqrt{2^2 + 2^2 + 0^2} = 5,5762\text{\AA} . \quad (5.2)$$

Die Gitterkonstante von reinem Si- und Ge-Kristall betragen jeweils 5,4309Å und 5,66Å. Gemäß der Vegard'schen Regel errechnet sich die Ge-Konzentration in der mit NGGFR=2,0 abgeschiedenen Schicht  $\chi_{(Ge\_2,0)}$  zu

$$\chi_{(Ge\_2,0)} = \frac{a_{(2,0)} - a_{Si}}{a_{Ge} - a_{Si}} = 63,4\% , \quad (5.3)$$

wobei  $a_{Si}$  und  $a_{Ge}$  entsprechend die Gitterkonstanten von reinem Si- und Ge-Kristall repräsentieren. Auf die gleiche Weise kann die Ge-Konzentration der mit NGGFR=0,7 abgeschiedenen Schicht zu  $\chi_{(Ge\_0,7)} = 48,4\%$  abgeschätzt werden. Es gibt zwischen den beiden Ge-Konzentrationen einen Unterschied von 15%. Auch mit der XRD-Messung zeigt sich deutlich den Unterschied in der Ge-Konzentration, der durch variierten gesamten Gasfluss bedingt wird. Genauere Information über den absoluten Ge-Gehalt liefert die EDX-Analyse.

Mit der XRD-Untersuchung wurde nicht nur die verbesserte Kristallinität, sondern auch die wachsende Ge-Konzentration, der mit zunehmender gesamter Gasflussrate abgeschiedenen SiGe Schichten, nachgewiesen. Die Zunahme der Ge-Konzentration kann auf die verkürzte Teilchen-Verweilzeit der Prozessgase in der Prozesskammer zurückgeführt werden. Gemäß der Gleichung 3.6 ist die Gas-Teilchen-Verweilzeit  $t_v$  umgekehrt proportional zu dem Gasfluss  $\zeta$ . Je größer der Gasfluss ist, desto kleiner ist die Verweilzeit der Gas-Teilchen in der Prozesskammer. Die Bindungsenergie der chemischen Bindung  $H_3Ge-H$  ist  $346\text{kJmol}^{-1}$  [65], während die der chemischen Bindung  $H_3Si-H$   $378\text{kJmol}^{-1}$  [66] beträgt. Eine Energie-Übertragung mit einer Größe zwischen  $346\text{kJmol}^{-1}$  und  $378\text{kJmol}^{-1}$  kann nur die chemische Bindung Ge-H, aber nicht die chemische Bindung Si-H, abtrennen. Je länger die Gas-Moleküle in der Prozess-Kammer bleiben, desto mehr Chancen gibt es, die chemischen Bindungen der Moleküle durch energeti-

sche Stöße im Plasma getrennt zu werden. Unter einer ausreichend großen Verweilzeit der Moleküle können die Trennungen der beiden Sorten von Bindungen, nämlich Ge-H und Si-H Bindung, sich in Sättigung befinden. In diesem Zustand wird die Ge-Konzentration der abgeschiedenen Schicht von dem Verhältnis der SiH<sub>4</sub>-Flussrate zu der GeH<sub>4</sub>-Flussrate bestimmt. Wenn der gesamte Gasfluss steigt, und folglich die Verweilzeit der Gas-Teilchen sinkt, haben die Ge-H Bindungen wegen ihrer kleineren Bindungsenergie mehr Chancen, sich zu lösen, als die Si-H Bindungen, so dass mehr Ge-Atome als Si-Atome in die Schicht integriert werden. Somit wird der Mechanismus 1 in Seite 60 erklärt.

Aufgrund der XRD-Ergebnisse kann gemäß der Scherrer-Gleichung die Größe der Nanokristalle in der SiGe-Schicht abgeschätzt werden [67]. Allerdings geht es nur bei den Schichten mit niedrigem Kristallisationsgrad, da die Scherrer-Gleichung nur für Nanokristalle gilt, deren Dicke kleiner als 1000Å ist. Weil die SiGe-Schicht mit großem gesamtem Gasfluss ziemlich große kegelförmige Kristalle besaß, und die Schicht mit NGGFR=0,5 keine XRD-Signale zeigte, wurde die Nanokristalle-Größe der SiGe Schicht mit NGGFR=0,7 untersucht. Gemäß der Scherrer-Gleichung wird die Kristalle-Dicke der SiGe Schicht errechnet zu

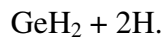
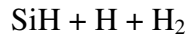
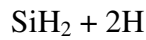
$$D_K = \frac{K \cdot \lambda}{B \cdot \cos \theta} = \frac{0,89 \times 1,54056 \text{Å}}{0,0068 \times \cos 23,15^\circ} \approx 219 \text{Å}, \quad (5.4)$$

wobei  $K$  den Scherrer-Formfaktor (zu 0,89 angenommen) repräsentiert, und  $B$  die Halbwertsbreite des XRD-Peaks symbolisiert. Für die Rechnung wurde der Peak der Netzebene (220) der SiGe-Schicht mit NGGFR=0,7 (Abbildung 5.10) verwendet. Aus dem Ergebnis der Gleichung 5.4 ist zu erkennen, dass Nanokristalle in dieser SiGe-Schicht vorhanden sind, obwohl Kristalle mit größeren Dimensionen noch nicht gebildet werden.

In-situ bor-dotierte Ge-Schichten wurden mit verschiedenen gesamten Gasflüssen abgeschieden, während die anderen Parameter konstant gehalten wurden. Es wurde ebenfalls beobachtet, dass der spezifische Widerstand der Schichten mit dem steigenden gesamten Gasfluss abnimmt (siehe Seite 65). Da es sich hier um reines Germanium handelt, gilt der oben genannte Mechanismus nicht mehr. Es muss andere Mechanismen außerhalb des durch den variierenden gesamten Gasfluss veränderten Si/Ge Verhältnisses in der abgeschiedenen Schicht geben. Folgend wird ein vermuteter Mechanismus vorgeschlagen (Mechanismus 2 auf Seite 60).

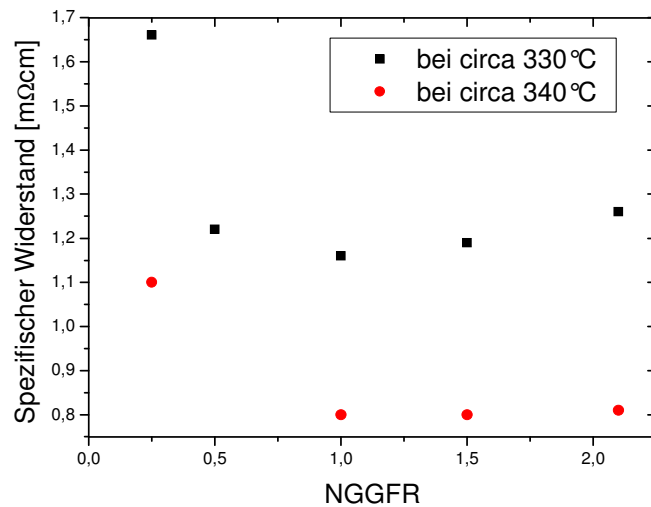
Gemäß der Arbeit von Doyle et al. werden Monosilan (SiH<sub>4</sub>) und Monogerman (GeH<sub>4</sub>) in Plasma entsprechend in drei und zwei Sorten von Molekül-Segmenten / Radikalen umgewandelt [68][69][70]:



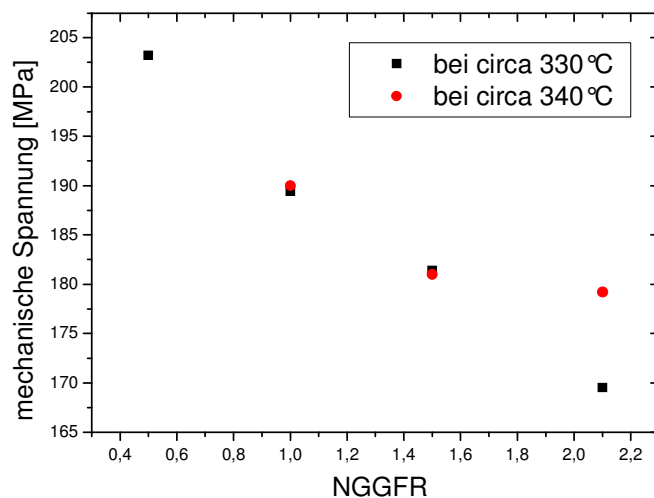


Wie in Abschnitt 3.1.3 diskutiert, werden die chemischen Eigenschaften eines Plasmas von der Gasteilchen-Verweilzeit bestimmt [34][71][72][73]. Konkret im hier betrachteten Fall, kann das Verhältnis der Konzentration von  $\text{XH}_3$  zu derjenigen von  $\text{XH}_2$  ( $\text{X}=\text{Si}$  oder  $\text{Ge}$ ) im Plasma von der Gasteilchen-Verweilzeit beeinflusst werden. Die Gasteilchen-Verweilzeit ist eine Funktion der gesamten Gasflussrate und des Gas-Drucks. Wird entweder die gesamte Gasflussrate oder der Gas-Druck variiert, verändert sich die Gasteilchen-Verweilzeit. Im hier betrachteten Fall ist die gesamte Gasflussrate der variierende Parameter, während alle anderen Parameter bei verschiedenen Abscheidungen konstant gehalten werden. Je größer der Gesamtgasfluss ist, desto kleiner ist die Verweilzeit der Gasteilchen. Eine verringerte Gasteilchen-Verweilzeit vergrößert den Quotient  $\text{XH}_3$ -Konzentration /  $\text{XH}_2$ -Konzentration. D.h., dass der Anteil von  $\text{XH}_3$  im Plasma mit dem zunehmenden Gesamtgasfluss steigt. Die Oberflächen-Beweglichkeit von  $\text{XH}_3$ -Radikalen ist größer als diejenige von  $\text{XH}_2$ -Radikalen [58][59][60] und eine größere Oberflächen-Beweglichkeit der Radikale wird die Kristallinität der abgeschiedenen Schicht begünstigen [61][62]. Folglich wird die Kristallinität der abgeschiedenen SiGe/Ge-Schicht mit der Zunahme des gesamten Gasflusses verbessert. Dieser Mechanismus kann ebenfalls eine Rolle bei dem Phänomen spielen, dass die Kristallisation der abgeschiedenen SiGe- oder Ge-Schichten mit wachsendem Gesamtgasfluss verbessert wird.

Um nachzuweisen, dass ohne die Zunahme der Ge-Konzentration in der Schicht die Kristallisation der Schicht alleine durch die verkürzte Verweilzeit der Gasteilchen in gewissem Maße verbessert werden kann, wurden bor-dotierte Ge-Schichten mit verschiedenen gesamten Gasflüssen abgeschieden.



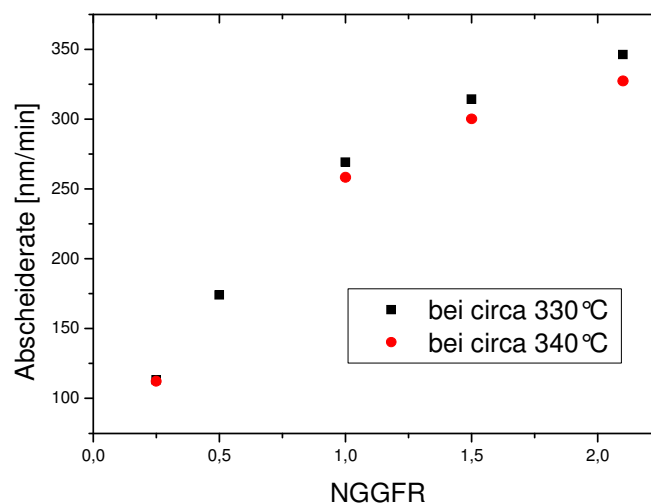
**Abbildung 5.11:** Spezifischer Widerstand der Ge-Schichten, die mit verschiedenen gesamten Gasflussraten bei einer Substrat-Temperatur von circa 330°C und 340°C abgeschieden wurden. Die Gaszusammensetzung entsprach UGV, die elektrische Leistung betrug 66W, und der Elektrodenabstand betrug 369mil (9,3726mm).



**Abbildung 5.12:** Abhängigkeit der mechanischen Spannung der Ge-Schichten, die bei Substrat-Temperaturen von circa 330°C und circa 340°C abgeschieden wurden, mit der gesamten Gasflussrate.

Die Abscheidungstests der Ge-Schichten wurden auf 8-Zoll Wafer mit vorab abgeschiedenem USG (undotiertes Silikatglas) ausgeführt, wobei die Gaszusammensetzung beim PECVD Prozess UGV entsprach. Bei der Abscheidung betrug

der Elektrodenabstand 369mil (9,3726mm) und die Plasma-Leistung 66W. Die gesamte Gasflussrate wurde variiert, während alle anderen Parameter konstant blieben. In Abbildung 5.11 wird der spezifische Widerstand der abgeschiedenen Ge-Schicht gegen den normalisierten gesamten Gasfluss eingetragen. Bei der Substrattemperatur von circa 330°C ist der spezifische Widerstand der Ge-Schicht mit  $NGGFR=0,25$  ungefähr  $0,5m\Omega cm$  größer als derjenige der Schichten mit den anderen gesamten Gasflussraten. Bei der Substrattemperatur von 340°C beträgt dieser Unterschied circa  $0,3m\Omega cm$ . Weil es sich hier um eine reine Ge-Schicht handelt, wird kein Einfluss von der Zunahme der Ge-Konzentration in der Schicht auf die Kristallinität der Schicht ausgeübt. Die Verbesserung der Kristallinität bei vergrößerten gesamten Gasflussraten wird vermutlich durch die größere Oberflächen-Beweglichkeit von  $XH_3$  Radikalen (Mechanismus 2 in Seite 60) verursacht.



**Abbildung 5.13:** Abhängigkeit der Abscheiderate der Ge-Schichten, die bei einer Substrattemperatur von circa 330°C und circa 340°C abgeschieden wurden, mit der gesamten Gasflussrate bei der Abscheidung. Der Elektrodenabstand lag bei 369mil (9,3726mm) und die Leistung betrug 66W.

In Abbildung 5.12 wird die mechanische Spannung der oben erwähnten Ge-Schichten gegen die gesamte Gasflussrate bei der Abscheidung eingetragen. Diesen Schichten wurden wie den SiGe Schichten in Abbildung 5.7 Zugspannungen zugewiesen. Mit der Erhöhung der gesamten Gasflussrate wird der Betrag der Zugspannung immer kleiner. Diese Tendenz ist ähnlich wie die der in Abbildung 5.7 demonstrierten SiGe Schichten. Eine gute Leitfähigkeit und eine kleine mechanische Spannung traten bei diesen Ge-Schichten gleichzeitig auf.

Abbildung 5.13 zeigt die Abhängigkeit der Abscheidungsrate der Ge-Schichten von der gesamten Gasflussrate bei der Abscheidung, wobei die Substrat-

Temperaturen circa 330°C und circa 340°C betrugen. Die Abscheidungsrate nimmt zu, während die gesamte Gasflussrate wächst. Die Abscheidungsrate bei NGGFR=0,25 ist circa 120nm/min und steigt bei NGGFR=2,1 auf circa 320nm/min. Ab NGGFR=1,5 ist eine Tendenz der Sättigung der Abscheidungsrate zu erkennen. Es gibt kaum Unterschiede zwischen den Abscheidungsraten bei der Substrat-Temperatur von 330°C und 340°C. Das deutet an, dass die Abscheidung nicht von der Oberflächen-Reaktion limitiert wird.

### **5.2.2 Bedeutung des Phänomens der durch erhöhten gesamten Gasfluss verursachten Kristallinität**

In der aktuellen Technik kann die PECVD-Abscheidung von poly-kristallinem SiGe bei einer Substrat-Temperatur von circa 450°C nur mit dem Einsatz eines LPCVD-Poly-SiGe-Saat-Schicht realisiert werden [37][74]. In dieser Promotionsarbeit wurde Poly-SiGe mit einer guten Leitfähigkeit (Spezifischer Widerstand circa 1,4mΩ-cm) und einer Ge-Konzentration von circa 80% bei einer Substrat-Temperatur von ungefähr 375°C abgeschieden. Der Grund dafür, warum Poly-SiGe-Schichten mit guter Leitfähigkeit bei so niedriger Substrat-Temperatur abgeschieden werden konnten, ist die durch die Vergrößerung der gesamten Gasflussrate bedingte Verkürzung der Verweilzeit der Gas-Teilchen in der Prozesskammer. Die Mechanismen für das Phänomen werden im Abschnitt 5.2.1 diskutiert.

In dieser Arbeit wurde die gesamte Gasflussrate beim PECVD-Prozess extrem hoch gesetzt, verglichen mit der üblichen gesamten Gasflussrate in der aktuellen Technik. Eine typische NGGFR in der aktuellen Technik liegt zwischen 0,1 und 0,2 bei einem typischen Kammer-Druck von 2Torr [55] [75]. Zum Vergleich, wurde die PECVD Abscheidung der Poly-SiGe Schichten in dieser Arbeit teilweise mit NGGFR=2,0 oder 2,1 bei 2Torr durchgeführt. Darüber hinaus wurde Ar anstatt Wasserstoff für die Verdünnung der Prozessgase in dieser Arbeit verwendet, während in aktueller Technik meistens Wasserstoff für diesen Zweck eingesetzt wurde [74] [37] [75][55][57][76]. Die Ar-Verdünnung wird in Abschnitt 5.3 diskutiert.

## **5.3 PECVD Abscheidung von phosphor-dotierten SiGe-Schichten**

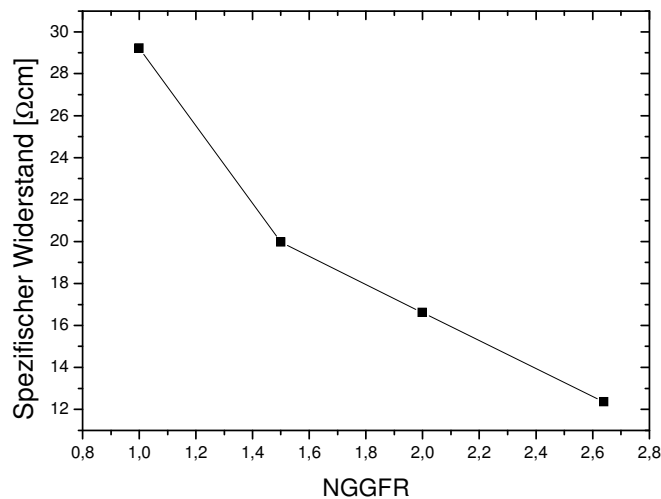
Diese Abscheidungsversuche wurden auf vorab abgeschiedenem PECVD USG (SiO<sub>2</sub>) auf 8-Zoll Wafern durchgeführt. Der Elektrodenabstand beim PECVD-Prozess betrug 300mil (7,62mm).

### **5.3.1 PECVD Abscheidung von phosphor-dotierten SiGe Schichten mit erhöhter gesamter Gasflussrate**

Um den Effekt einer erhöhten gesamten Gasflussrate auf die Eigenschaften der phosphor-dotierten SiGe-Schicht zu untersuchen, wurden SiGe-Schichten mit in-situ Phosphor-Dotierung bei einer Substrat-Temperatur von circa 370°C und einer

Plasma-Leistung von 66W abgeschieden. Bei den Abscheidungen wurde die gesamte Gasflussrate variiert, während die anderen Parameter konstant blieben. Die Gaszusammensetzung entsprach dabei USGV.

In Abbildung 5.14 wird die Abhängigkeit des spezifischen Widerstandes der SiGe-Schichten von der gesamten Gasflussrate dargestellt. Der spezifische Widerstand sinkt mit wachsender gesamter Gasflussrate. Dieses Phänomen kann auch auf die in Abschnitt 5.2.1 diskutierten Mechanismen zurückgeführt werden. Der spezifische Widerstand bei NGGFR=1,0 liegt bei circa 29Ω-cm, und bei NGGFR=2,64 sinkt dieser Wert auf 12,4Ω-cm. Die großen spezifischen Widerstände der Schichten deuten dahin, dass diese Schichten noch zum größten Teil amorph sind. Nanokristalle konnten vermutlich in den Schichten gebildet werden.



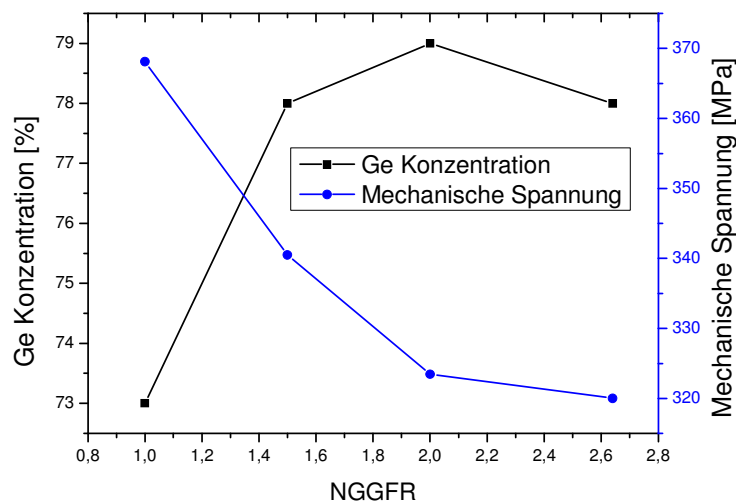
**Abbildung 5.14:** Abhängigkeit des spezifischen Widerstandes der phosphor-dotierten SiGe Schicht von der gesamten Gasflussrate. Die SiGe Schichten wurden bei einer Substrat-Temperatur von circa 370°C und einem Elektroden-Abstand von 300mil (7,62mm) mit einer elektrischen Leistung von 66W abgeschieden.

Abbildung 5.15 stellt die Abhängigkeit der Ge-Konzentration der SiGe Schicht von der gesamten Gasflussrate dar. Die Ge-Konzentration nimmt mit zunehmender gesamter Gasflussrate zu, was ähnlich bei der bor-dotierten SiGe Schicht ist. Der Anstieg der Ge-Konzentration geht ab NGGFR=1,5 in die Sättigung. Im Sättigungsbereich liegt die Ge-Konzentration bei circa 79%. Die Ge-Konzentration ist bei NGGFR=1,0 am kleinsten, und beträgt 73%.

Die mechanische Spannung der phosphor-dotierten SiGe-Schichten wird ebenso in Abbildung 5.15 gegen die gesamte Gasflussrate aufgetragen. Diese SiGe-Schichten besitzen eine ziemlich hohe Zugspannung im Bereich zwischen

320MPa und 370MPa. Die Zugspannung nimmt mit dem Anstieg der gesamten Gasflussrate ab. Die Minderung der Zugspannung kann auf das verstärkte Integrieren von Wasserstoff-Atomen in der abgeschiedenen Schicht zurückgeführt werden, das durch die mit dem wachsenden Gesamtfluss zunehmende Abscheiderate verursacht wird [37] [77].

Die Abscheidungsrate der phosphor-dotierten SiGe-Schicht ist in Abbildung 5.16 gegen die gesamte Gasflussrate bei der Abscheidung aufgetragen. Ähnlich wie bei der Abscheidung der bor-dotierten SiGe Schicht nimmt die Abscheidungsrate mit zunehmender gesamter Gasflussrate zu, was darauf hindeutet, dass diese Abscheidung von der Zulieferung der Schicht-bildenden Atome begrenzt wird. Die Abscheidungsrate bei NGGFR=1,0 liegt bei circa 285nm/min, und die bei NGGFR=2,64 beträgt ungefähr 320nm/min. Bei NGGFR=2,64 zeigt sich eine Tendenz der Sättigung der Abscheidungsrate.



**Abbildung 5.15:** Abhängigkeit der Ge-Konzentration und der mechanischen Spannung der phosphor-dotierten SiGe Schicht von der gesamten Gasflussrate. Die SiGe Schichten wurden bei einer Substrat-Temperatur von circa 370°C und einem Elektroden-Abstand von 300mil (7,62mm) mit einer elektrischen Leistung von 66W abgeschieden.

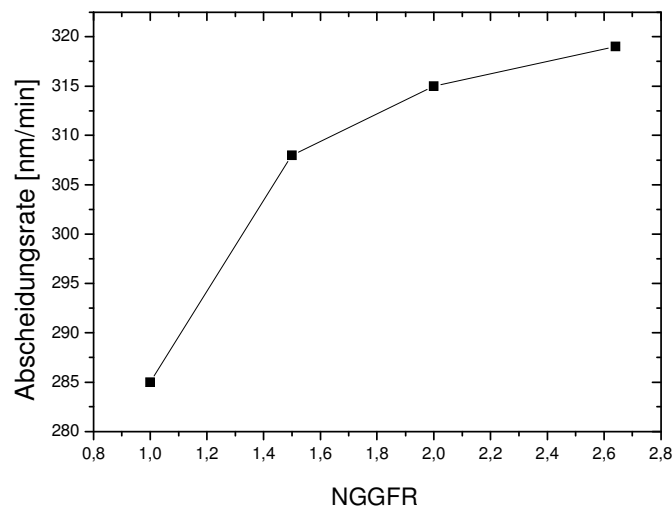
### 5.3.2 PECVD Abscheidung von phosphor-dotierten SiGe Schichten mit verschiedenen Ar-Verdünnungen

Um die Auswirkung von verschiedenen Ar-Verdünnungen zu untersuchen, wurden phosphor-dotierte SiGe Schichten bei einer Substrat-Temperatur von circa 370°C und einer Plasma-Leistung von 66W abgeschieden. Die gesamte Gasflussrate bei diesen Versuchen war 3131sccm. Die Komposition der Flussrate von SiH<sub>4</sub> (100%), GeH<sub>4</sub> (100%) und PH<sub>3</sub> (5% in Ar) hat das Verhältnis 15 : 21 : 20. Reines

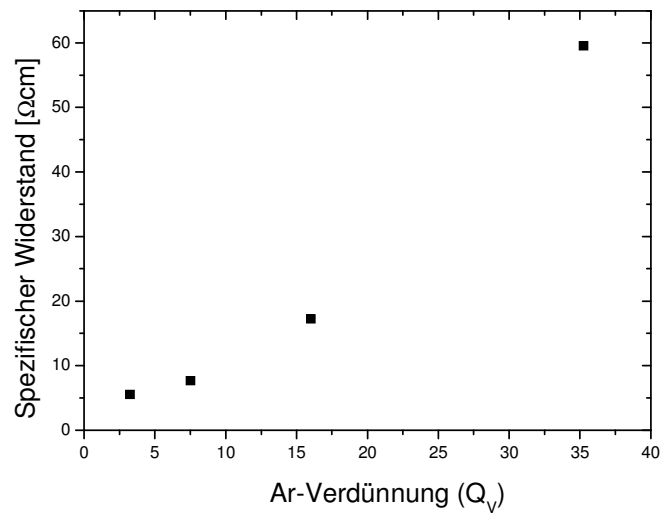
Ar-Gas wurde zudem zu der Verdünnung der Prozess-Gase eingesetzt. Der Quotient der Ar-Flussrate (inklusive des Ar-Gases zusammen mit  $\text{PH}_3$ ) zu der Flussrate aller anderen Prozessgase wird hier als  $Q_V = (\text{Flussrate von Ar}) / (\text{Flussrate von SiH}_4 + \text{Flussrate von GeH}_4 + \text{Flussrate von PH}_3(100\%))$  definiert.

Abbildung 5.17 stellt die Abhängigkeit des spezifischen Widerstandes der SiGe-Schicht von  $Q_V$  dar. Der spezifische Widerstand nimmt mit dem Anstieg der Ar-Verdünnung  $Q_V$  zu. Bei  $Q_V=3,25$  beträgt der spezifische Widerstand  $5,5\Omega\text{cm}$ , und er steigt auf  $59\Omega\text{cm}$  bei  $Q_V=35,26$ .

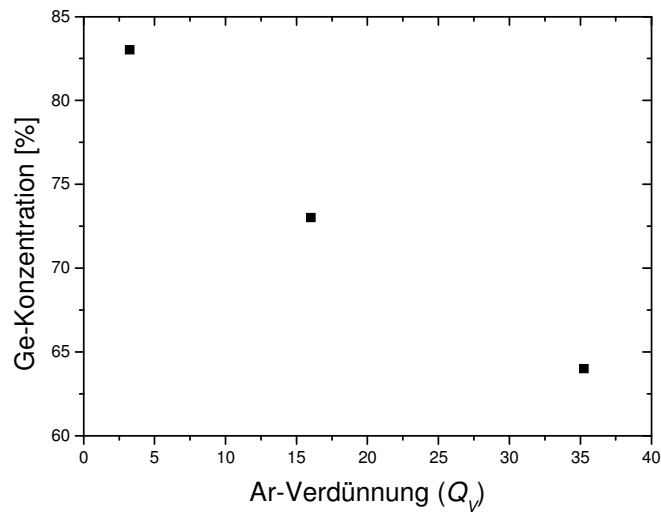
Dieser Effekt kann auf unterschiedliche Ge-Konzentration in der SiGe Schicht zurückgeführt werden, die durch die verschiedenen Ar-Verdünnungen bedingt ist. Je größer die Ge-Konzentration ist, desto besser wird die SiGe-Schicht kristallisiert. Ein besserer Kristallisationsgrad führt zu der Abnahme des spezifischen Widerstandes der Schicht. In Abbildung 5.18 ist die Ge-Konzentration der SiGe-Schicht gegen die Ar-Verdünnung  $Q_V$  aufgetragen. Die Ge-Konzentration sinkt mit wachsender Ar-Verdünnung  $Q_V$ . Bei  $Q_V=3,25$  ist die Ge-Konzentration 83%, und sie sinkt auf 64% bei  $Q_V=35,26$ .



**Abbildung 5.16:** Abhängigkeit der Abscheidungsrate der phosphor-dotierten SiGe-Schicht von der gesamten Gasflussrate. Die SiGe Schichten wurden bei einer Substrat-Temperatur von circa  $370^\circ\text{C}$  und einem Elektroden-Abstand von 300mil (7,62mm) mit einer elektrischen Leistung von 66W abgeschieden.

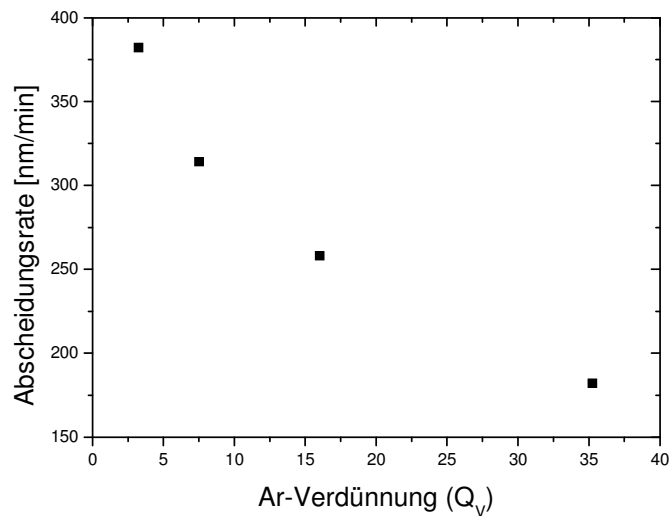


**Abbildung 5.17:** Abhängigkeit des spezifischen Widerstandes der phosphor-dotierten SiGe-Schicht von der Ar-Verdünnung  $Q_V$ . Die gesamte Gasflussrate betrug 3131 sccm.



**Abbildung 5.18:** Abhängigkeit der Ge-Konzentration der phosphor-dotierten SiGe-Schicht von der Ar-Verdünnung  $Q_V$ . Die gesamte Gasflussrate betrug 3131 sccm.



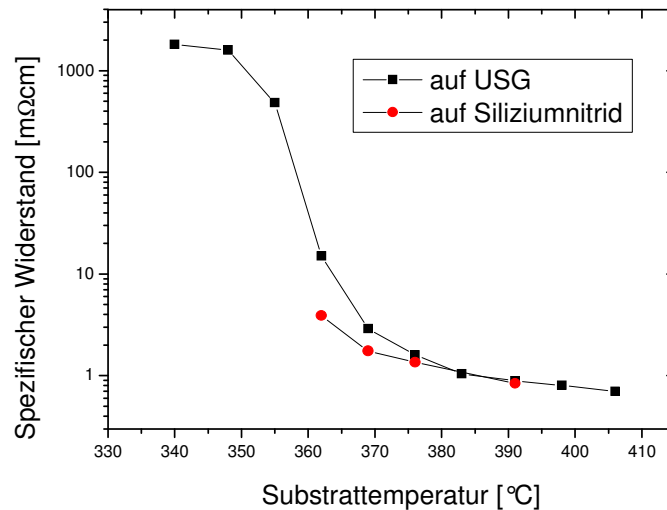


**Abbildung 5.19:** Abhängigkeit der Abscheidungsrate der phosphor-dotierten SiGe Schicht von der Ar-Verdünnung  $Q_V$ . Die gesamte Gasflussrate betrug 3131sccm.

Die Verringerung der Ge-Konzentration in der Schicht wegen der Erhöhung der Ar-Verdünnung  $Q_V$  wird von der Zunahme des Ar-Anteils in der Gasmischung verursacht. Es wird vermutet, dass ein Stoß mit einem Ar-Ion eine ausreichende Energie zu einer chemischen Bindung übergeben kann, so dass die beiden Sorten von chemischen Bindungen, Ge-H oder Si-H, getrennt werden können. Er ist nicht der Fall, dass die übergebene Energie nur eine Ge-H Bindung lösen kann, und nicht ausreichend groß ist, um eine Si-H Bindung zu trennen. Wenn der Anteil der Ar-Ionen in der Gasmischung mit der Erhöhung der Ar-Verdünnung zunimmt, steigt die Wahrscheinlichkeit für die Moleküle (oder Molekülsegmente), mit den Ar-Ionen zu stoßen. Da die Stöße mit Ar-Ionen beide Bindungen aufspalten können, wird die Erleichterung bei der Trennung von Ge-H Bindung infolge ihrer kleineren Bindungsenergie abgeschafft. Das führt zu der Verringerung der Ge-Konzentration in der SiGe Schicht. Eine Sättigung dieser Verringerung mit der weitere Zunahme der Ar-Verdünnung wird erwartet. Die Abnahme der Ge-Konzentration verschlechtert die Kristallisation der SiGe-Schicht, und hebt folglich den spezifischen Widerstand der SiGe Schicht an (Abbildung 5.17).

In Abbildung 5.19 ist die Abscheidungsrate der phosphor-dotierten SiGe Schicht gegen die Ar-Verdünnung  $Q_V$  aufgetragen. Die Abscheidungsrate der SiGe Schicht nimmt mit zunehmender Ar-Verdünnung ab. Bei  $Q_V=3,25$  beträgt die Abscheidungsrate 382nm/min, und sie sinkt auf 182nm/min bei  $Q_V=35,26$ . Mit der Erhöhung der Ar-Verdünnung wird der Anteil der schicht-bildenden Gase ( $\text{GeH}_4$ ,  $\text{SiH}_4$  und  $\text{PH}_3$ ) in der Gasmischung reduziert. Die Abnahme der Abscheidungsrate mit wachsender Ar-Verdünnung deutet darauf hin, dass die hier betrachteten Abscheidungen von der Zulieferung der schicht-bildenden Atome begrenzt werden.

#### 5.4 PECVD Abscheidung von bor-dotierten SiGe-Schichten bei verschiedenen Substrat-Temperaturen



**Abbildung 5.20:** Abhängigkeit des spezifischen Widerstandes der in-situ bor-dotierten SiGe-Schicht von der Substrat-Temperatur bei der Abscheidung. Die gesamte Gasflussrate betrug 2728sccm und die elektrische Leistung war 66W.

Die in-situ bor-dotierten SiGe Schichten wurden bei verschiedenen Substrattemperaturen mit PECVD Prozessen abgeschieden, um die Auswirkung der Substrat-Temperatur auf die Filmeigenschaften zu überprüfen. Der Elektrodenabstand bei der Abscheidung betrug 300mil (7,62mm), und die Plasma-Leistung war 66W. Die Abscheidungen wurden durchgeführt mit einer gesamten Gasflussrate von 2728sccm (NGGFR=2,0). Die Zusammensetzung der Gasmischung entsprach USGV. Die SiGe Schichten wurden auf vorab abgeschiedenem USG oder silizium-reichem Nitrid (Brechungsindex: 2,3) auf 8-Zoll Wafern abgeschieden.

Abbildung 5.20 zeigt die Abhängigkeit des spezifischen Widerstandes der SiGe-Schicht von der Substrat-Temperatur bei der Abscheidung. Der spezifische Widerstand der Schicht auf USG unterscheidet sich leicht von dem der Schicht auf Siliziumnitrid. Der Übergang vom amorphen zum kristallinen Bereich tritt bei einer Substrat-Temperatur von circa 360°C auf, da der spezifische Widerstand bei dieser Temperatur mit einem Sprung absinkt. Im amorphen Bereich beträgt der Spezifische Widerstand circa 2000mΩcm, während er im kristallinen Bereich unter 1mΩcm liegt. Im Bereich der Substrat-Temperatur zwischen 360°C und 375°C zeigen die Filme auf Siliziumnitrid niedrigere spezifische Widerstände als die auf USG.

**Tabelle 5.1:** Ge-Konzentration der auf USG abgeschiedenen SiGe Schicht bei verschiedenen Substrat-Temperaturen.

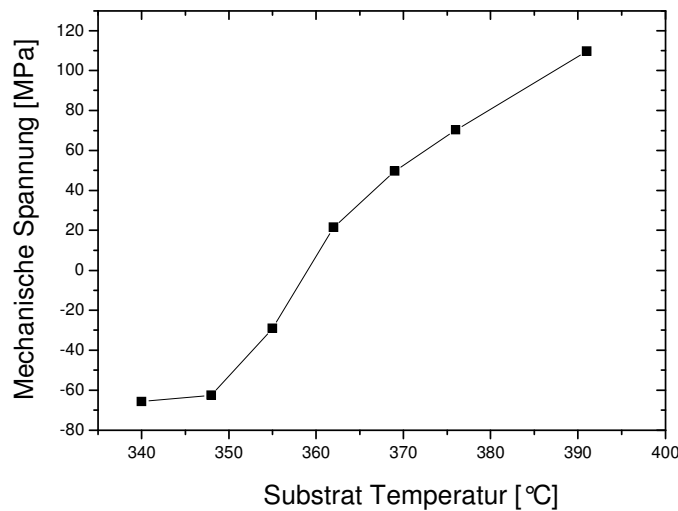
Substrat-Temperatur [°C]	340	348	355	362	369	376	383	391	398	406
Ge-Konzentration [%]	82	81	80	81	81	81	82	81	82	82

**Tabelle 5.2:** Ge-Konzentration der auf Siliziumnitrid abgeschiedenen SiGe Schicht bei verschiedenen Substrat-Temperaturen.

Substrat-Temperatur [°C]	362	369	376	391
Ge-Konzentration [%]	81	83	81	81

Die Ge-Konzentrationen der auf USG und Siliziumnitrid abgeschiedenen SiGe-Schicht werden entsprechend in Tabelle 5.1 und

Tabelle 5.2 zusammengefasst. Die Ge-Konzentration beträgt für alle SiGe-Schichten ungefähr 80%, und sie ist unabhängig von der Substrat-Temperatur. Zusammen mit den Diskussionen in Abschnitt 5.1 ist zu erkennen, dass die Substrat-Temperatur keinen Einfluss auf die Ge-Konzentration der Schicht hat, während die gesamte Gasflussrate eine entscheidende Rolle spielt. Das deutet an, dass die Dissoziation der Ge-H und Si-H Bindungen bei der Abscheidung im Plasma, und nicht auf der Wafer-Oberfläche, stattfindet. Die durch Variation der gesamten Gasflussrate bedingte Veränderung der Gas-Teilchen-Verweilzeit bestimmt die chemische Eigenschaft des Plasmas (siehe Abschnitt 3.1.3).

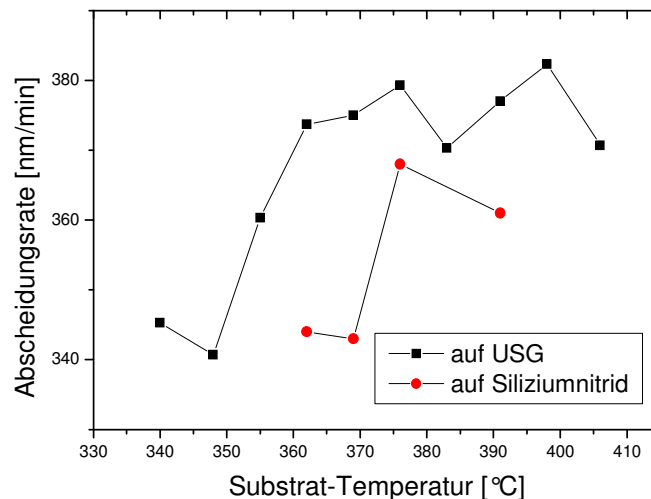


**Abbildung 5.21:** Abhängigkeit der mechanischen Spannung der in-situ bor-dotierten SiGe Schicht von der Substrat-Temperatur bei der Abscheidung. Die gesamte Gasflussrate betrug 2728sccm und die elektrische Leistung war 66W. Die SiGe Filme wurden auf USG abgeschieden.

In Abbildung 5.21 ist die mechanische Spannung der auf USG abgeschiedenen SiGe-Schichten gegen die Substrat-Temperatur aufgetragen. Das Minus-Zeichen der mechanischen Spannungen bedeutet, dass diese Spannungen Druckspannungen sind. Mit wachsender Substrat-Temperatur steigt die mechanische Spannung. Ein Übergang von Druck- zu Zugspannung passiert bei einer Substrat-Temperatur von circa 360°C. Bei einer Substrat-Temperatur von 390°C beträgt die Zugspannung der Schicht 110MPa, und die bei einer Substrat-Temperatur von circa 340°C abgeschiedene Schicht besitzt eine Druckspannung von -66MPa. Beim PECVD-Prozess werden die *dangling bonds* in der abgeschiedenen Schicht durch Wasserstoffatome sättigt, die aus  $\text{GeH}_4$ ,  $\text{SiH}_4$  und  $\text{B}_2\text{H}_6$  dissoziiert werden. So entsteht in der Schicht ein gewisser Wasserstoff-Gehalt. Mit Erhöhung der Substrat-Temperatur wird der Wasserstoff-Gehalt in der Schicht weniger, was die Spannung der Schicht in Richtung Zugspannung treibt [37] [77].

Die Abscheidungsrate der in-situ Bor-dotierten SiGe-Schichten ist in Abbildung 5.22 gegen die Substrat-Temperatur aufgetragen. Mit der Erhöhung der Substrat-Temperatur steigt die Abscheidungsrate leicht. Die Abscheidungsrate der Schichten auf USG liegt bei einer Substrat-Temperatur kleiner als 350°C ungefähr bei 340nm/min, und steigt mit einem Sprung bei circa 360°C auf 375nm/min. Bei der Substrat-Temperatur größer als 360°C bleibt die Abscheidungsrate der SiGe Schichten auf USG relativ konstant, was darauf hindeutet, dass sie sich in dem Sättigungsbereich befindet. Der Sprung der Abscheidungsrate der Schichten auf Siliziumnitrid tritt bei einer Substrat-Temperatur von circa 375°C auf. Die Abscheidungsrate vor und nach dem Sprung liegt entsprechend bei circa 340nm/min

und 365nm/min. Nach dem Sprung geht die Abscheidungsrate der SiGe Schichten auf Siliziumnitrid in die Sättigung. Obwohl die Variation der Substrat-Temperatur gewisse Veränderung der Abscheidungsrate bringt, ist der Betrag der Veränderung ziemlich klein. In Abbildung 5.8 in Abschnitt 5.1.3 ist zu erkennen, dass kaum Unterschiede in den Abscheidungsraten der SiGe Schichten zu sehen sind, die entsprechend bei den Substrat-Temperaturen von 365°C, 369°C und 376°C abgeschieden wurden. Aufgrund der Erkenntnis aus Abbildung 5.22 sind diese Temperaturen in dem Sättigungsbereich der Abscheidungsrate. Die Tatsache, dass die Abscheidungsrate im Sättigungsbereich kaum von der Substrat-Temperatur abhängig ist, bedeutet, dass die Aktivierungsenergien für die Reaktion der Gasteilchen hauptsächlich vom Plasma, und nicht vom erhitzten Substrat stammen.



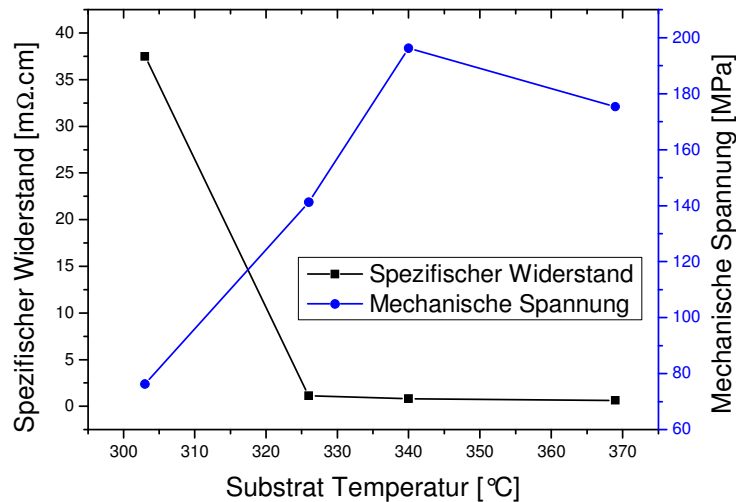
**Abbildung 5.22:** Abhängigkeit der Abscheidungsrate der in-situ bor-dotierten SiGe Schicht von der Substrat-Temperatur bei der Abscheidung. Die gesamte Gasflussrate betrug 2728sccm und die elektrische Leistung war 66W. Die SiGe Filme wurden auf USG und Siliziumnitrid abgeschieden.

## 5.5 PECVD Abscheidung von bor-dotierten Ge Schichten bei verschiedenen Substrat-Temperaturen

Bor-dotierte Ge-Schichten wurden bei verschiedenen Substrat-Temperaturen auf vorab abgeschiedenem USG auf 8-Zoll Wafer abgeschieden. Die gesamte Gasflussrate war 2728sccm (NGGFR=2,0). Die Gaszusammensetzung entsprach UGV. Der Elektrodenabstand betrug 300mil (7,62mm). Die Leistung des Plasmas und der Druck waren jeweils 66W und 2Torr.

Abbildung 5.23 zeigt die Abhängigkeit des spezifischen Widerstandes der Ge Schichten von der Substrat-Temperatur. Der spezifische Widerstand ist eine Reflexion des Kristallisationsgrades der Ge Schicht. Mit wachsender Substrat-

Temperatur wird die Kristallinität der Schicht besser, so dass der spezifische Widerstand abnimmt. Bei der Substrat-Temperatur von 326°C sinkt der spezifische Widerstand auf circa 1mΩ-cm, was bedeutet, dass die Ge-Schicht schon ab dieser Temperatur poly-kristallisiert wird. Ab dieser Temperatur liegt der spezifische Widerstand unter 1mΩcm. Diese Temperatur ist circa 30°C niedriger als die Übergangstemperatur bei Si<sub>20</sub>Ge<sub>80</sub>-Schichten (Abbildung 5.20).



**Abbildung 5.23:** Abhängigkeit des spezifischen Widerstandes und der mechanischen Spannung der in-situ bor-dotierten Ge-Schicht von der Substrat-Temperatur.

Die Abhängigkeit der mechanischen Spannung der Ge-Schicht von der Substrat-Temperatur ist ebenso in Abbildung 5.23 dargestellt. Es ist eine Zugspannung in der Ge-Schicht in diesem Temperaturbereich zu sehen. Im Temperatur-Bereich kleiner als 340°C steigt die Zugspannung mit zunehmender Substrat-Temperatur. Ab 340°C geht die Erhöhung der mechanischen Spannung in die Sättigung. Der Anstieg der Zugspannung kann auf die Reduzierung des H-Gehaltes in der Schicht zurückgeführt werden, und die Sättigung darauf hindeutet, dass alle Wasserstoffatome in der Schicht wegen der Wärme weg diffundiert sind [37] [77].

**Tabelle 5.3:** Abscheidungsrate der in-situ Bor-dotierten Ge Schicht bei verschiedenen Substrat-Temperaturen.

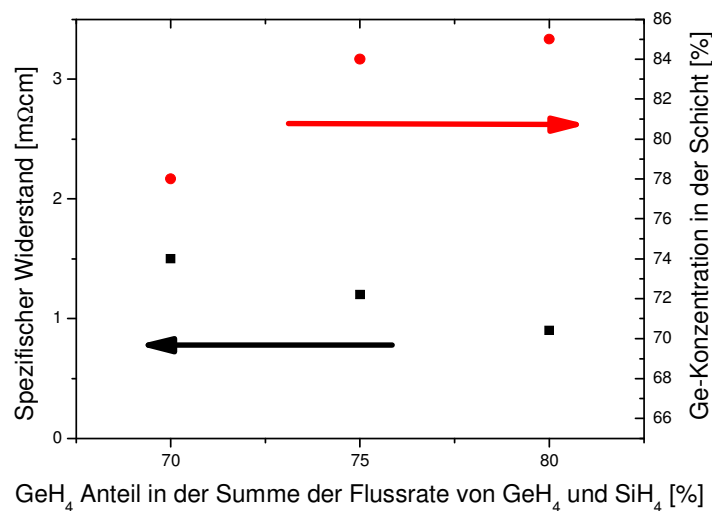
Substrat-Temperatur [°C]	303	326	340	369
Abscheidungsrate [nm/min]	334	335	331	346

In Tabelle 5.3 sind die Abscheidungsraten der Ge-Schicht bei verschiedenen Substrat-Temperaturen zusammengefasst. Die Substrat-Temperatur verändert kaum die Abscheidungsrate im vorliegenden Temperaturbereich, was darauf hindeutet, dass die Aktivierungsenergien für die Reaktion der Gasteilchen hauptsächlich vom Plasma, und nicht vom erhitzten Substrat stammen.

**Tabelle 5.4:** Ge-Konzentration der SiGe Schicht bei verschiedenen  $\text{GeH}_4$  Anteilen in der gesamten Flussrate von  $\text{GeH}_4$  und  $\text{SiH}_4$ .

$\text{GeH}_4$ Anteil in der gesamten Flussrate von $\text{GeH}_4$ und $\text{SiH}_4$ [%]	70	75	80
Ge-Konzentration in der SiGe Schicht [%]	78	84	85

## 5.6 PECVD Abscheidung von bor-dotierten SiGe Schichten mit verschiedenen $\text{GeH}_4$ zu $\text{SiH}_4$ Verhältnissen



**Abbildung 5.24:** Die spezifische Widerstand (linke y-Achse) und die Ge-Konzentration (rechte y-Achse) der SiGe Schicht bei verschiedenen  $\text{GeH}_4$  Anteilen in der gesamten Flussrate von  $\text{GeH}_4$  und  $\text{SiH}_4$ . Die Summe der Flussrate von  $\text{GeH}_4$  und  $\text{SiH}_4$  betrug 90sccm.

Die Gaszusammensetzung in den meisten PECVD- oder CVD-Prozessen in dieser Arbeit entsprach USGV. Um die Auswirkung der Variation des  $\text{GeH}_4$  Anteils in der Gasmischung auf die Film-Eigenschaften zu untersuchen, wurden SiGe-Filme

mit verschiedenen  $\text{GeH}_4$ -Anteilen abgeschieden und charakterisiert. Die gesamte Gasflussrate war dabei 683sccm (NGGFR=0,5). Die Flussraten von  $\text{GeH}_4$  und  $\text{SiH}_4$  betrugen insgesamt 90sccm. Die Flussraten von Ar und  $\text{B}_2\text{H}_6$  waren jeweils 568sccm und 25sccm. Bei den Versuchen wurde das  $\text{GeH}_4$ - zu  $\text{SiH}_4$ -Verhältnis variiert. Der Elektrodenabstand betrug 369mil (9,3726mm). Die elektrische Leistung war 66W.

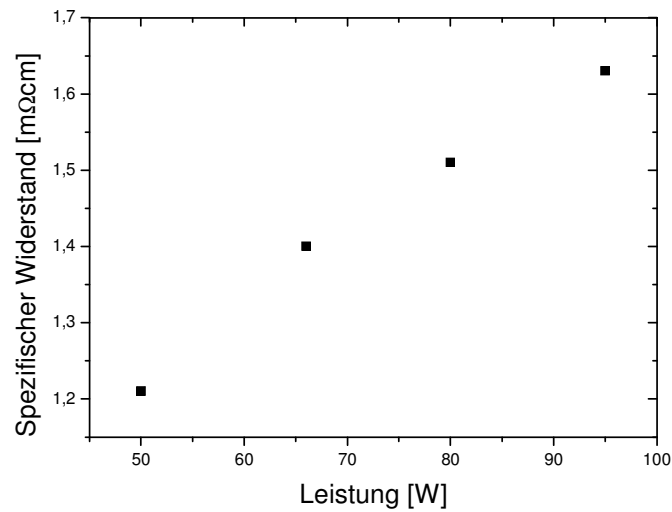
In Tabelle 5.4 sind die Ge-Konzentrationen der SiGe-Schicht bei verschiedenen  $\text{GeH}_4$ -Anteilen in der gesamten Flussrate von  $\text{GeH}_4$  und  $\text{SiH}_4$  zusammengefasst. Die Ge-Konzentration ist immer höher als der  $\text{GeH}_4$ -Anteil. Zum Vereinfachen wird GA als  $\text{GA} = (\text{Flussrate von } \text{GeH}_4) / (\text{Flussrate } \text{GeH}_4 + \text{Flussrate } \text{SiH}_4)$  definiert. Bei  $\text{GA}=70\%$  resultiert eine Ge-Konzentration von 78% in der SiGe-Schicht. Da die Bindungsenergie der Ge-H-Bindung kleiner als die der Si-H-Bindung ist, trägt  $\text{GeH}_4$  effektiver als  $\text{SiH}_4$  zu der Schicht-Bildung bei.

In Abbildung 5.24 sind der spezifische Widerstand (linke y-Achse) und die Ge-Konzentration (rechte y-Achse) der SiGe Schicht gegen GA eingetragen. Der spezifische Widerstand liegt im GA-Bereich von 70% bis 80% bei circa 1m $\Omega$  cm. GA beträgt bei der Abscheidung mit der normalen Gaszusammensetzung (USGV) 58%, und folglich ist die Ge-Konzentration der mit USGV abgeschiedenen SiGe-Schicht niedriger, und der spezifische Widerstand der Schicht somit größer. Es ist in Abbildung 5.24 zu erkennen, dass mit der Zunahme von GA die Ge-Konzentration in der Schicht steigt, und der Spezifische Widerstand abnimmt. Eine größere Ge-Konzentration in der Schicht reduziert die amorph-kristalline Sprungtemperatur, und damit wird die Kristallinität der Schicht verbessert.

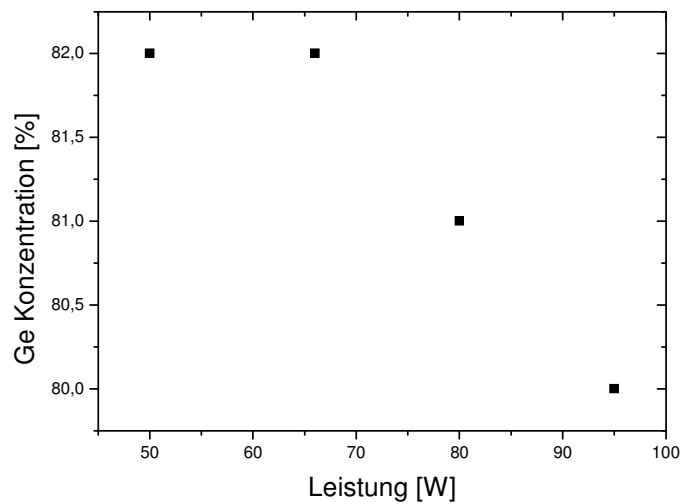
### **5.7 PECVD Abscheidung von bor-dotierten SiGe Schichten mit verschiedenen elektrischen Leistungen**

Um die Auswirkung der Variation der Plasma-Leistung auf die Filmeigenschaft zu untersuchen, wurden PECVD-Abscheidungen von in-situ Bor-dotierten SiGe-Schichten auf 8 Zoll Wafern mit vorab abgeschiedenem USG bei verschiedenen Plasma-Leistungen durchgeführt. Der Elektrodenabstand betrug dabei 300mil (7,62mm). Die Gaszusammensetzung entsprach USGV, und NGGFR war gleich 2,1. Die Abscheidungen wurden bei einer Substrat-Temperatur von circa 375°C durchgeführt.





**Abbildung 5.25:** Spezifischer Widerstand der in-situ bor-dotierten SiGe Schicht bei verschiedenen elektrischen Leistungen. NGGFR war gleich 2,1 und die Substrat-Temperatur betrug circa 375°C.



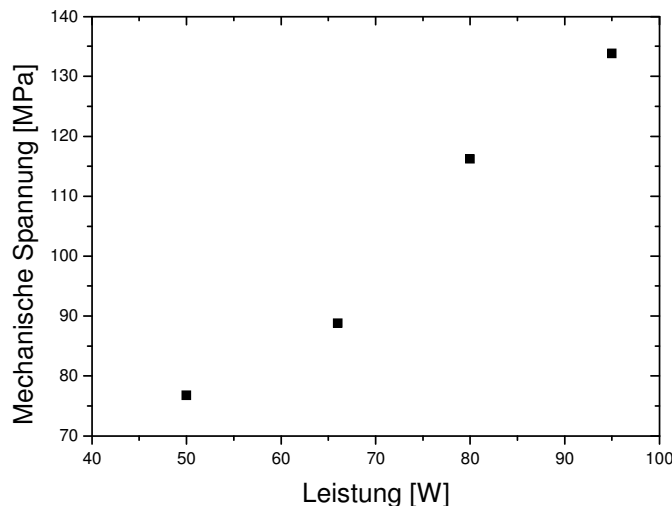
**Abbildung 5.26:** Ge-Konzentration der in-situ Bor-dotierten SiGe Schichten bei verschiedenen elektrischen Leistungen.

Abbildung 5.25 zeigt den spezifischen Widerstand der SiGe Schichten bei verschiedenen Plasma-Leistungen. Mit wachsender Plasma-Leistung nimmt der spezifische Widerstand annähernd linear zu. Das ist auf 2 Mechanismen zurückzuführen:

1. Die Ge-Konzentration der SiGe Schicht sinkt mit der Zunahme der Plasma-Leistung (siehe unten), und die Verringerung der Ge-Konzentration führt zu schlechterer Kristallinität und damit einem erhöhten spezifischen Widerstand der Schicht.
2. Mit einer erhöhten Leistung kriegen die Gas-Teilchen mehr Energie vom Plasma, und der Beschuss der energetischen Teilchen auf der Wafer-Oberfläche wird verstärkt, was die Kristallisation der wachsenden Schicht beeinträchtigt.

In Abbildung 5.26 ist die Ge-Konzentration der SiGe Schicht gegen die Plasma-Leistung aufgetragen. Mit der Zunahme der Plasma-Leistung nimmt die Ge-Konzentration leicht ab. Gasmoleküle können bei erhöhter Leistung mehr Energie vom Plasma bekommen. Das führt dazu, dass mehr Si-H-Bindungen im Plasma getrennt werden, weil die Bindungsenergie der Si-H-Bindung größer als die der Ge-H-Bindung ist. Allerdings ist in der Abbildung 5.26 zu sehen, dass die Abnahme der Ge-Konzentration sehr gering ist, nur circa 2%. Folglich ist der Einfluss der Ge-Konzentration auf den spezifischen Widerstand der Schicht relativ gering (siehe Abbildung 5.25).

Abbildung 5.27 zeigt die mechanische Spannung der SiGe-Schicht, die bei verschiedenen Leistungen abgeschieden wurden. Im hier betrachteten Leistungsbe-  
reich haben die Schichten Zugspannungen, deren Beträge mit wachsender Leistung fast linear zunehmen. Dieser Fall ist ähnlich wie bei der Abscheidung der a-Si Schichten, wobei die mechanische Spannung der Schichten durch Variation der Plasma-Leistung eingestellt werden kann.



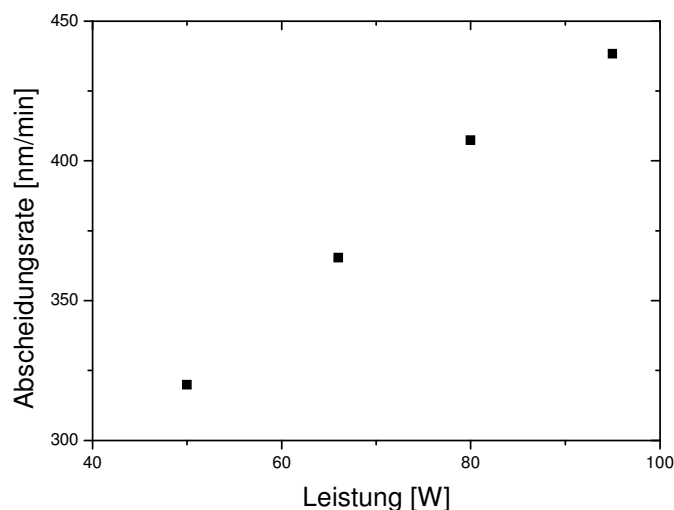
**Abbildung 5.27:** Mechanische Spannung der in-situ Bor-dotierten SiGe Schichten bei verschiedenen elektrischen Leistungen.

In Abbildung 5.28 ist die Abscheidungsrate der Ge-Schicht gegen die Plasma-Leistung dargestellt. Mit der Erhöhung der Plasma-Leistung steigt die Abscheidungsrate annähernd linear. Die erhöhte Plasma-Leistung fördert die Dissoziation und Anregung der Gasteilchen im Plasma, und folglich die Anlagerung der Schicht-bildenden Atome auf der Wafer-Oberfläche.

## 5.8 Zusammenfassung

Die Eigenschaften der SiGe- und Ge-Schichten, die mittels des PECVD Verfahrens abgeschieden wurden, wurden bei Variationen der verschiedenen Depositionsparameter, wie der gesamte Gasfluss, die elektrische Leistung, die Gaszusammensetzung und die Substrat-Temperatur, untersucht.

Ein neues Phänomen, dass die Kristallinität des Films durch die Erhöhung des gesamten Gasflusses gefördert wird, wurde beobachtet. Mit zunehmendem gesamtem Gasfluss wird die Verweilzeit der Gasteilchen in der Prozesskammer verkürzt. Die verkürzte Verweilzeit führt dazu, dass mehr Ge-Atome in die abgeschiedene Schicht integriert werden, und folglich wird die Kristallinität der abgeschiedenen Schicht gefördert. Zudem kann die verkürzte Verweilzeit dazu führen, dass der Anteil der  $\text{XH}_3$ -Radikale ( $\text{X}=\text{Si}$  oder  $\text{Ge}$ ) im Plasma vergrößert wird, und damit die Kristallinität der abgeschiedenen Schicht wegen der größeren Oberflächen-Beweglichkeit der  $\text{XH}_3$ -Radikale gefördert wird.

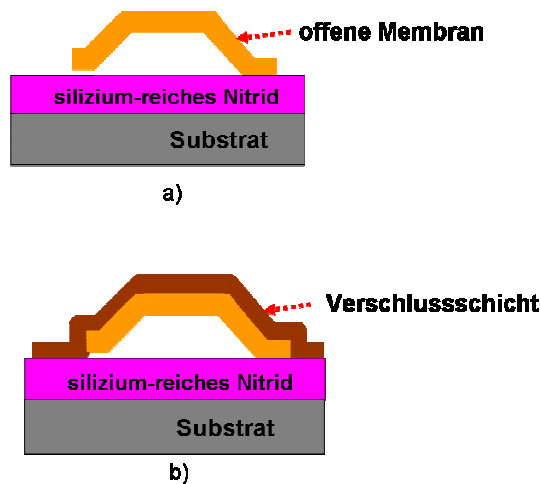


**Abbildung 5.28:** Abscheidungsrate der in-situ bor-dotierten SiGe Schichten bei verschiedenen elektrischen Leistungen.

Aufgrund des neu beobachteten Phänomens wurde eine neue Methode für Poly-SiGe- und Poly-Ge-Abscheidung entwickelt. Die Vorteile dieser Abscheidungsme-

thode sind die niedrige Prozesstemperatur, die hohe Abscheidungsrate und der vereinfachte Abscheidungsprozess (ohne CVD-Saat-Schicht). Diese neuartige Abscheidungsmethode wurde in dieser Arbeit für die Herstellung der Druckdose mit Poly-SiGe oder Poly-Ge Membran verwendet.

## 6 Materialien und Strukturen für die Integrationskonzepte



**Abbildung 6.1:** Kurze Beschreibung der Herstellung der Druckdose mit Membran aus den Materialien, die bei CMOS-kompatiblen Temperaturen abgeschieden werden können. a) Herstellung der offenen Membran, die einen Raum nur bis ein paar dünnen Kanäle ummantelt. b) Verschießen der Kanäle mit Verschlusschicht.

Abbildung 6.1 beschreibt, wie in dieser Arbeit eine Druckdose mit einer Membran aus den Materialien (in dieser Arbeit: SiGe, Ge oder a-Si), die bei CMOS-kompatiblen Temperaturen abgeschieden werden können, per Oberflächen-Mikromechanik-Verfahren (*surface micromachining*) auf einem Dummy Wafer hergestellt wurde. Zunächst wird eine offene Membran mit PECVD SiGe (für SiGe Dose), PECVD Ge (für Ge Dose) oder PECVD a-Si (für a-Si Dose) erzeugt, die den Innenraum der Druckdose bis auf ein paar dünne Kanäle komplett ummantelt. Danach werden die Kanäle mit einer Verschlusschicht verschlossen.

Das erste Thema in diesem Kapitel sind die Materialien für die offene Membran. Anschließend werden die Verschlusschichten für das Verschießen der Druckdose diskutiert. Durchkontaktierung aus SiGe oder Ge wird als das dritte Thema betrachtet.

### 6.1 Materialien für die offene Membran

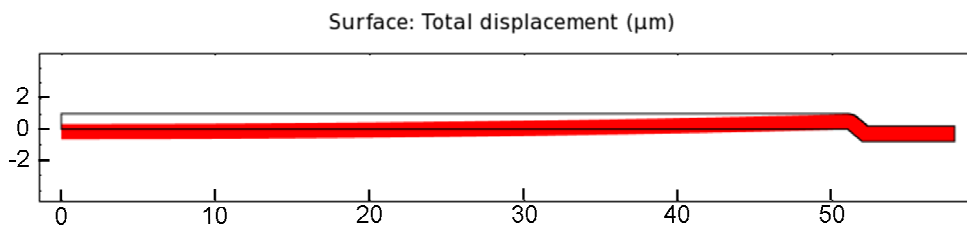
Bei dem vorliegenden Druckdosen-Prozess bildet die Seitenwand der Druckdose einen Winkel von circa  $45^\circ$  mit der Wafer-Oberfläche. In dieser Konfiguration verursacht eine Zugspannung in der Membran eine Durchbiegung der Membran nach unten, und eine Druckspannung einen Buckel nach oben. Da ein Buckel der Membran die Kapazität der Druckdose reduziert und somit die Auswertung der

Kapazität erschwert, soll das Material für die Druckdose-Membran eine Zugspannung besitzen.

In diesem Abschnitt wird zuerst der Effekt der mechanischen Spannung der Druckdosenmembran auf die Form der Membran diskutiert, und danach werden die für die offene Membran eingesetzten Materialien nacheinander diskutiert.

### 6.1.1 Effekt der Spannung der Druckdosenmembran auf die Form der Membran

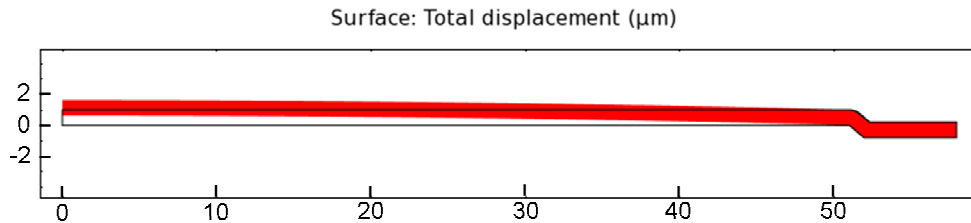
Werden die Effekte von Druckbelastung, Gravitation und anderen Quellen vernachlässigt, verursacht eine mechanische Zugspannung in einer an einer Kante befestigten Membran eine Ebenheit der Membran, d.h., dass die Membran unter dieser Bedingung glatt ist. Allerdings kann die im Rahmen dieser Arbeit hergestellte Membran bei der Untersuchung der Auswirkung der mechanischen Spannung in der Membran nicht als eine an einer Kante befestigten Membran betrachtet werden. Die Seitenwand und folglich die Kante der hier hergestellten Druckdose sind beweglich. Darüber hinaus verursacht die nasschemische Strukturierung der Opferschicht eine schräge Seitenwand, die einen Winkel von circa  $45^\circ$  mit der Waferoberfläche hat (siehe Abbildung 6.1). Dies führt zu einem speziellen Effekt bei der Verformung der Membran, der von der mechanischen Spannung der Membran hervorgerufen wird.



**Abbildung 6.2:** Mit „COMSOL Multiphysics“ simulierte Durchbiegung einer Druckdose mit kreisförmiger Membran, die eine Zugspannung von 600MPa besitzt. Der Radius der Druckdose ist  $51\mu\text{m}$  und der Abstand zwischen der Membran und der unteren Oberfläche des Innenraums der Druckdose beträgt  $1\mu\text{m}$ .

Die Auswirkung der mechanischen Spannung an der Form der Membran wurde mit FEM analysiert. Dabei wurde die Simulationssoftware „COMSOL Multiphysics“ verwendet. Abbildung 6.2 zeigt die simulierte Durchbiegung einer kreisförmigen Druckdose mit einem Radius von  $51\mu\text{m}$ , wobei die Membran der Druckdose eine Zugspannung von 600MPa besitzt. Die zweidimensionale Simulation stellt die Hälfte des Querschnittes durch die Mitte der Druckdose dar. Die schwarze Linie in der Abbildung bezeichnet die Kontur der Membran ohne mechanische Spannung. Die Dicke der Membran beträgt  $1\mu\text{m}$  und das Material der Membran ist Germanium. Es gibt unter diesen Bedingungen eine Abweichung von 651nm

am Zentrum der Membran. Die Durchbiegung der Membran ist nach unten gerichtet.



**Abbildung 6.3:** Mit „COMSOL Multiphysics“ simulierte Durchbiegung einer Druckdose mit kreisförmiger Membran, die eine Druckspannung von 600MPa besitzt. Der Radius der Druckdose ist 51µm und der Abstand zwischen der Membran und der unteren Oberfläche des Innenraums der Druckdose beträgt 1µm.

Abbildung 6.3 stellt das Ergebnis der Simulation einer Membran mit den oben angegebenen Eigenschaften dar, jedoch mit einer Druckspannung von 600MPa. Bei dieser Druckspannung beträgt der Betrag der zentralen Abweichung wie die Membran mit 600MPa Zugspannung auch 651nm, allerdings verbiegt sich die Membran nach oben. Obwohl als Membranmaterial bei der Simulation Germanium angenommen wird und die Dimensionen der Druckdose auch festgelegt werden, gilt für Membranen mit anderen Materialien und Dimensionen auch die Tatsache, dass Zugspannung in der Membran zu einer Durchbiegung der Membran nach unten führt, während Druckspannung einer Durchbiegung nach oben bedingt. Dies wird von der beweglichen Kante und der schrägen Seitenwand der Druckdose verursacht. Die Simulation zeigt, dass die Durchbiegung der Membran durch die mechanische Spannung der Membran eingestellt werden kann.

### 6.1.2 Materialien für die offene Membran der SiGe- und Ge-Druckdose

Das erste Thema dieses Abschnitts sind die Abscheidungsparameter und die Eigenschaften der Materialien, die für die offene Membran der SiGe- und Ge-Druckdose eingesetzt werden. Im zweiten Teil dieses Abschnitts wird der Haftungstest von zwei dieser Materialien diskutiert.

#### 6.1.2.1 Abscheidung und Eigenschaften der Materialien für die offene Membran der SiGe und Ge Druckdose

Um die Post-CMOS Integration der Druckdose durchzuführen, müssen die entsprechenden Prozesse unter circa 450°C (Substrat-Temperatur) ausgeführt werden. Die Diskussionen in Kapitel 5 zeigen, dass PECVD von SiGe und Ge Filmen wegen der niedrigen Abscheidungstemperatur diese Bedingung sehr gut erfüllen kann. Da die Membran der Druckdose als eine Elektrode der Druckdose-Kapazität dient, muss die Membran gut leitend sein.

**Tabelle 6.1:** Die für die Produktion der offenen Membran der SiGe oder Ge-Druckdose eingesetzten PECVD Materialien.

Kürzel	SiGe-A	SiGe-B	Ge-A
Material	Poly-SiGe	Poly-SiGe	Poly-Ge
Gaszusammensetzung	USGV <sup>1</sup>	GA <sup>2</sup> =75% Sonst wie bei USGV	UGV <sup>3</sup>
NGGFR	2,1	0,5	1,5
Leistung	125W	66W	66W
Elektrodenabstand	369mil (9,37mm)	369mil (9,37mm)	369mil (9,37mm)
Substrat-Temperatur	circa 380°C	circa 375°C	circa 340°C

Aufgrund der in Kapitel 5 beschriebenen Experimente wurden drei Materialien für die PECVD offene Membran der SiGe- und Ge-Druckdose gewählt, und zwar zwei Sorten von PECVD SiGe und eine Sorte von PECVD Ge. Die Abscheidungsparameter für die drei Materialien werden in Tabelle 6.1 zusammengefasst. Zur Vereinfachung werden dabei für die drei Materialien jeweils ein Kürzel definiert. Die mechanische Spannung und der spezifische Widerstand der drei Materialien wurden zuerst anhand eines Dummy-Wafers mit USG bestimmt. Der in dieser Arbeit verwendete Druckdosen-Prozess fordert, dass die Eigenschaften der Materialien auch auf Siliziumnitrid untersucht werden müssen.

Für die Herstellung der Druckdosen wurde USG als Opferschicht auf siliziumreichem Nitrid abgeschieden und strukturiert. Da die strukturierte USG-Opferschicht auf dem Wafer nur einen sehr kleinen Bereich bedeckte, hatte der Wafer hauptsächlich eine Nitrid-Oberfläche. Deshalb erfolgte die anschließende PECVD Abscheidung von Poly-SiGe oder Poly-Ge größtenteils auf einer Silizi-

---

<sup>1</sup> Siehe Seite 54 für die Definition des Kürzels.

<sup>2</sup> Siehe Seite 80 für die Definition des Kürzels.

<sup>3</sup> Siehe Seite 54 für die Definition des Kürzels.



umnitrid-Oberfläche. Dabei ist zu klären, ob die Eigenschaften der auf Siliziumnitrid abgeschiedenen SiGe- oder Ge-Schichten sich von denen der auf USG abgeschiedenen entsprechenden Schichten unterscheiden. Für diesen Zweck wurden die Eigenschaften von SiGe-A, SiGe-B und Ge-A anhand eines Dummy-Wafers mit silizium-reichem Nitrid bestimmt.

Zum Vergleich wurden die Filmeigenschaften der auf USG beziehungsweise auf Siliziumnitrid abgeschiedenen Materialien in Tabelle 6.2 zusammengefasst. Während die spezifischen Widerstände der beiden Varianten (auf USG und auf Nitrid) kaum Unterschiede zeigen, ist die mechanische Spannung der auf Nitrid abgeschiedenen Schicht immer kleiner als die der auf USG abgeschiedenen Schicht, d.h., dass die mechanische Spannung auf Nitrid mehr in Richtung der Druckspannung tendiert. Der Unterschied beträgt dabei 50 bis 100MPa. Obwohl alle in Tabelle 6.2 angegebenen mechanischen Spannungen positiv sind, und deswegen zur Zugspannung gehören, kam es dennoch vor, dass die auf USG abgeschiedene Schicht eine Zugspannung besaß, während dieselbe Schicht auf Nitrid eine Druckspannung hatte.

**Tabelle 6.2:** Vergleich der Eigenschaften der für die Druckdosen-Membran eingesetzten SiGe- und Ge-Filme auf USG und silizium-reichem Nitrid.

Material	Unterliegendes Material	Mechanische Spannung [MPa]	Spezifischer Widerstand [ $\text{m}\Omega \cdot \text{cm}$ ]
SiGe-A	USG	225	2,3
	Silizium-reiches Nitrid	170	2,3
SiGe-B	USG	241	1,24
	Silizium-reiches Nitrid	163	1,49
Ge-A	USG	211	0,8
	Silizium-reiches Nitrid	108	0,9

Der Elastizitätsmodul von SiGe-A, SiGe-B und Ge-A wurde mit Nanoindentierung an einer Schicht mit einer Dicke von 2000nm ermittelt. Die Ergebnisse sind 142GPa, 149GPa und 142GPa jeweils für SiGe-A, SiGe-B und Ge-A.

Infolge des in der vorliegenden Arbeit verwendeten Maskensatzes belegt die strukturierte USG Opferschicht nur circa 2% der Waferoberfläche und 98% wird von Nitrid besetzt. In diesem Fall gibt es drei Möglichkeiten für die mechanische Spannung in der auf dem Wafer abgeschiedenen SiGe oder Ge Schicht:

1. Die mechanische Spannung entspricht derjenigen einer auf einem USG Dummy-Wafer abgeschiedenen Schicht.
2. Die mechanische Spannung entspricht derjenigen einer auf einem Nitrid Dummy-Wafer abgeschiedenen Schicht.
3. Die mechanische Spannung an den Stellen, wo die USG Opferschicht unterliegt, ist gleich derjenigen einer auf einem USG Dummy-Wafer abgeschiedenen Schicht; die mechanische Spannung an den Stellen, wo Nitrid unterliegt, ist gleich derjenigen einer auf einem Nitrid Dummy-Wafer abgeschiedenen Schicht.

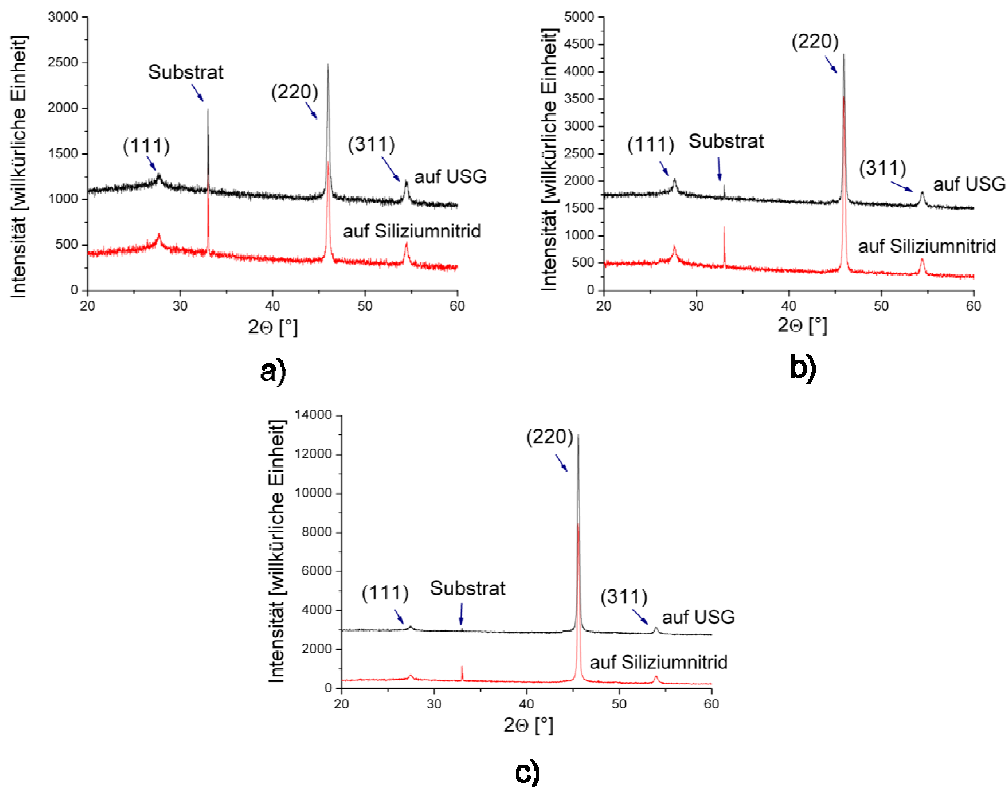
Die erste Möglichkeit kann vernachlässigt werden, da USG nur 2% der Waferoberfläche besetzt. Bei der dritten Möglichkeit muss angenommen werden, dass in einer geschlossenen Schicht 2 verschiedene mechanische Spannungen vorhanden sind, was unwahrscheinlich ist. So bleibt nur noch die zweite Möglichkeit, dass die mechanische Spannung derjenigen einer auf einem Nitrid Dummy-Wafer abgeschiedenen Schicht entspricht. Diese Vermutung stimmt sehr gut mit den Experiment-Resultaten überein.

Die unterschiedliche mechanische Spannung der SiGe- (oder Ge-) Schicht auf USG oder Nitrid kann auf zwei mögliche Ursachen zurückgeführt werden:

1. Die unterliegenden Materialien (USG oder Siliziumnitrid) bedingen die Unterschiede von Kristall-Strukturen in der Schicht, was zu verschiedener intrinsischer Spannung der Schicht führt.
2. Die verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten von USG und Siliziumnitrid verursachen bei der Abscheidung differierende Temperaturen der Waferoberfläche, was zu unterschiedlichen thermischen Spannungen der Schicht führt.

Um die erste Möglichkeit zu überprüfen, wurden gleiche SiGe- und Ge-Schichten auf USG und Siliziumnitrid abgeschieden. Anschließend wurden die Schichten mit XRD untersucht, um die Kristall-Strukturen in der Schicht zu charakterisieren. Die untersuchten Materialien sind SiGe-B, Ge-A und ein zusätzliches Material mit folgenden Abscheidungsparametern: Gaszusammensetzung=USGV, NGGFR=2,1, Leistung=35W, Substrat-Temperatur=375°C und Elektrodenabstand=369mil (9,3726mm). Das 2 $\theta$  Scannen bei der XRD-Untersuchung wurde von 20° bis 60° in Schritten von 0,0013° durchgeführt. Abbildung 6.4 zeigt die Messergebnisse

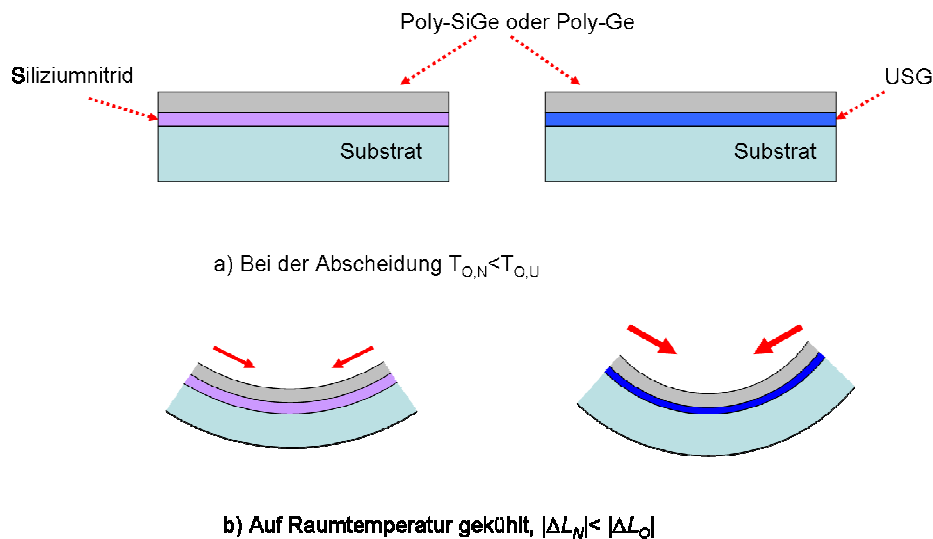
der XRD-Untersuchung. Beide Varianten weisen keine Unterschiede auf. Das deutet an, dass die verschiedenen unterliegenden Materialien keine unterschiedlichen Kristall-Strukturen in den SiGe oder Ge Schichten verursacht haben. Die unterschiedliche mechanische Spannung der auf USG und Siliziumnitrid abgeschiedenen SiGe- oder Ge-Schichten wird deshalb auf die differierenden Wärmeleitfähigkeiten von USG und Siliziumnitrid zurückgeführt.



**Abbildung 6.4:** XRD Messergebnisse der auf USG oder Siliziumnitrid abgeschiedenen Poly-SiGe oder -Ge Schichten. Zur besseren Anschaulichkeit werden die beiden Kurven manuell mit einer Versetzung entlang der y-Achse getrennt. a) Poly-SiGe, das mit den Parametern, Gaszusammensetzung=USGV, NGGFR=2,1, Leistung=35W, Substrat-Temperatur=375°C und Elektrodenabstand=369mil (9,3726mm), abgeschieden wurde; b) SiGe-B; c) Ge-A.

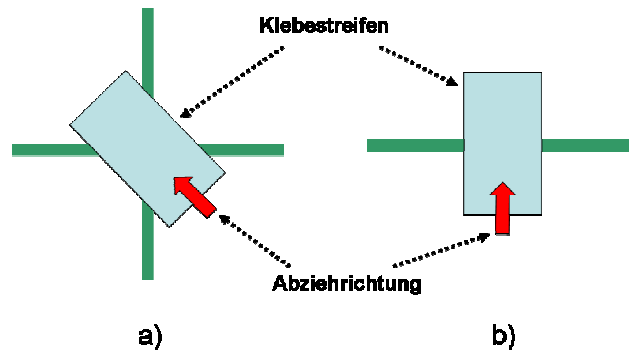
Während die Wärmeleitfähigkeit von  $\text{SiO}_2$  nur 0,014W/cm-K beträgt, ist die Wärmeleitfähigkeit von Siliziumnitrid mit 0,3W/cm-K ungefähr 20 Mal größer. Es wird vermutet, dass während der Abscheidung von Poly-SiGe oder Poly-Ge die lokale Temperatur der Waferoberfläche höher als die Substrat-Temperatur ist, weil einerseits die Oberflächenreaktionen Energie zur Waferoberfläche ausgeben können, und andererseits der Waferoberfläche direkt vom Plasma Energie zugeführt werden kann. Außerdem kann die thermische strahlung aus dem Plasma die Oberflächentemperatur des Substrates beeinflussen [78][79]. Wegen der größeren Wärmeleitfähigkeit vom Siliziumnitrid wird mehr Wärme von der Oberfläche zu

dem Substrat übergeleitet. Deswegen ist die Oberflächentemperatur bei der Abscheidung auf Nitrid  $T_{O,N}$  niedriger als bei der auf USG  $T_{O,U}$ . Nach der Abscheidung werden die Wafer auf die Raumtemperatur  $T_R$  gekühlt, und die SiGe- oder Ge-Schicht schrumpft ein. Der Betrag der Schrumpfung der SiGe oder Ge Schicht  $|\Delta L|$  ist proportional zu der Temperaturdifferenz  $\Delta T_N = T_{O,N} - T_R$  für die Schicht auf Nitrid beziehungsweise  $\Delta T_U = T_{O,U} - T_R$  für die Schicht auf USG. Da  $\Delta T_U > \Delta T_N$ , ist die Schrumpfung der Schicht auf USG  $|\Delta L_U|$  auch größer als die Schrumpfung der Schicht auf Nitrid  $|\Delta L_N|$ . Daher liegt die mechanische Spannung der Schicht auf USG ein Stück weiter in Richtung Zugspannung als die mechanische Spannung der Schicht auf Nitrid. Dieser Vorgang wird in Abbildung 6.5 schematisch dargestellt. Die präzise in-situ Messung der Oberflächentemperatur des Substrates muss mit speziellen Messverfahren durchgeführt werden [80][81][82], und ist außerhalb des Rahmens dieser Arbeit.



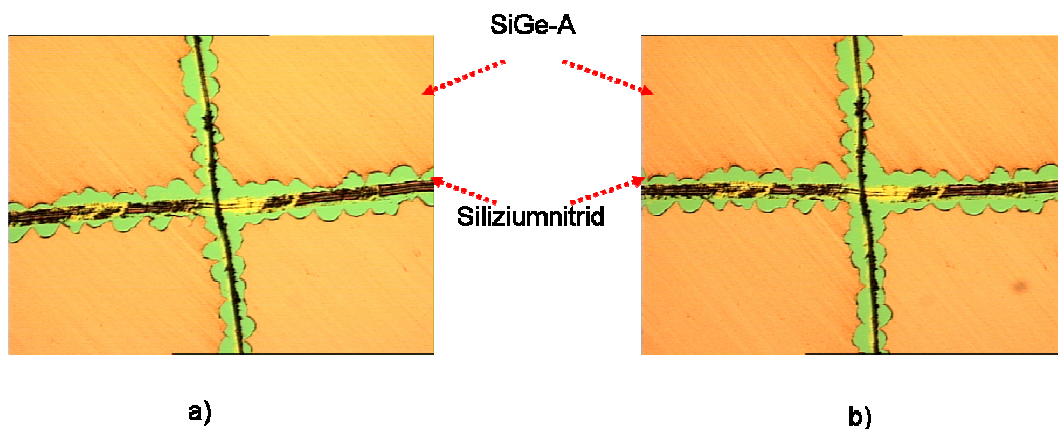
**Abbildung 6.5:** Schematische Darstellung der Ursache für die unterschiedliche mechanische Spannung der SiGe oder Ge Schicht auf Siliziumnitrid und USG.

### 6.1.2.2 Haftungstests von SiGe-A und SiGe-B auf Siliziumnitrid

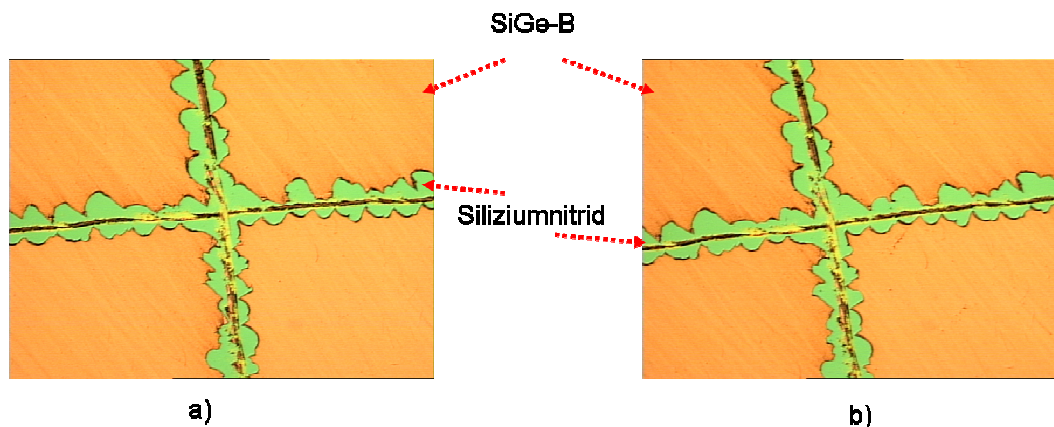


**Abbildung 6.6:** Schematische Darstellung von dem Anbringen und der Abziehrichtung des Klebestreifens an Kreuz a) und kurzer Linie b).

In dieser Arbeit wurde eine Methode für die qualitative Charakterisierung der Haftung von Schichten auf bestimmten Oberflächen („Klebe-Test“) eingesetzt [83]. In der zu testenden Schicht werden zuerst kurze Linien und Kreuze mit einem Diamant-Schneider eingraviert. Die Gravur ist so tief, dass die zu testende Schicht komplett durchdrungen ist. Die Bereiche, in denen die kurzen Linien und die Kreuze liegen, werden anschließend mit Isopropanol gereinigt. Danach wird jeweils ein Stück Klebestreifen (Typ VHB der Firma 3M), wie in Abbildung 6.6 gezeigt, an den kurzen Linien und den Kreuzen angebracht. Nach 30 Min. Lagerung werden die Klebestreifen wieder abgezogen. Die Abziehrichtung der Klebestreifen ist in Abbildung 6.6 dargestellt. Nach dem Abziehen der Klebestreifen wird die Topographie an den Kreuzen und kurzen Linien mit der vor dem Anbringen der Klebestreifen optisch-mikroskopisch verglichen. Aufgrund des Vergleichs wird die Haftung der Schicht qualitativ abgeschätzt.



**Abbildung 6.7:** „Klebe-Test“ für SiGe-A-Schicht auf Siliziumnitrid. a) mikroskopische Aufnahme vor dem Klebe-Test; b) mikroskopische Aufnahme nach dem Klebe-Test.



**Abbildung 6.8:** „Klebe-Test“ für SiGe-B-Schicht auf Siliziumnitrid. a) mikroskopische Aufnahme vor dem Klebe-Test; b) mikroskopische Aufnahme nach dem Klebe-Test.

Da die Herstellung der Druckdosen auf Siliziumnitrid realisiert wurde, erfolgte der Test der Haftung der zwei Membran-Materialien SiGe-A und SiGe-B auf einem Dummy-Wafer mit Siliziumnitrid-Oberfläche. Die Dicke der auf Siliziumnitrid abgeschiedenen SiGe-A und SiGe-B Schicht betrug  $2\mu\text{m}$ .

Abbildung 6.7 und Abbildung 6.8 zeigen den Vergleich eines Kreuzes vor und nach dem Klebe-Test entsprechend auf der SiGe-A- und SiGe-B-Schicht. Es sind kaum Unterschiede zu beobachten. So wurde qualitativ nachgewiesen, dass die beiden Materialien sehr gut auf Siliziumnitrid haften.

### 6.1.3 Materialien für die offene Membran der a-Si Druckdose

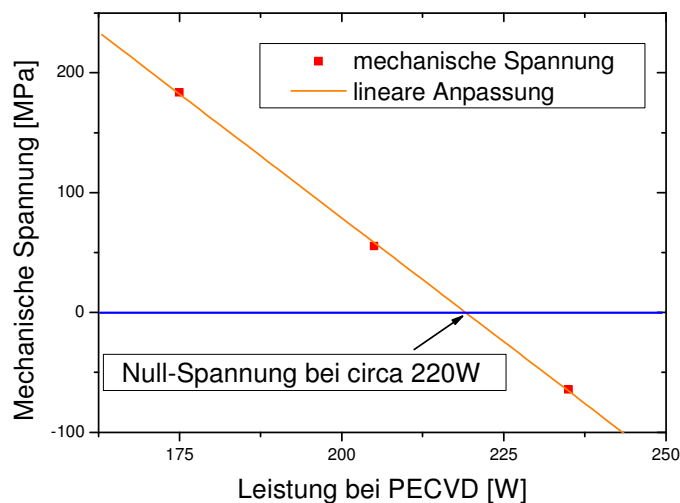
Im Vergleich mit PECVD von Poly-SiGe oder Poly-Ge kann amorphes Silizium (a-Si) bei niedrigerer Temperatur mit PECVD Methode abgeschieden werden. In den letzten Jahren wurden versucht, a-Si als Strukturschicht in MEMS zu verwenden [84]. Die Möglichkeit dafür, eine Druckdose mit a-Si Membran zu bauen, wurde im Rahmen dieser Arbeit auch untersucht. Da a-Si nicht gut leitend ist, muss gut leitende Schicht wie Metall in der a-Si Membran eingebettet werden. Zudem kann a-Si nicht direkt auf Metall-Öffnungen abgeschieden werden, um Durchkontaktierungen zu schaffen, während das bei der Druckdose mit Poly-SiGe oder Poly-Ge Membran realisiert werden kann. Diese Tatsachen verkomplizieren den Integrationsprozess der Druckdose mit a-Si Membran.

Als erster Schritt wurde versucht, die Membran einer Druckdose aus reinem a-Si (ohne die eingebettete leitende Schicht) herzustellen, um die mechanischen Eigenschaften von a-Si Membran zu untersuchen. Dabei sollen sowohl die offene Membran als auch die Verschlussschicht aus a-Si hergestellt werden.

### 6.1.3.1 Abscheidung und Eigenschaften der Materialien für die offene Membran der a-Si Druckdose

Um eine Druckdosen-Teststruktur mit relativ glatter Membran herzustellen, wurde zuerst die mechanische Spannung der a-Si Schicht untersucht. Die a-Si Schicht wurde auf PECVD USG, PECVD Siliziumnitrid und PECVD a-Si abgeschieden, und danach wurde die mechanische Spannung der a-Si Schicht auf diesen unterliegenden Schichten charakterisiert.

Die PECVD Abscheidung von a-Si wurde wie SiGe und Ge mit *Precision 5000* der Firma *Applied Materials* durchgeführt. Die Gasquelle für Silizium war 100% Monosilan ( $\text{SiH}_4$ ). Argon wurde zur Verdünnung des Monosilans verwendet. Die Flussrate von  $\text{SiH}_4$  und Argon waren 500sccm und 2000sccm. Der Kammerdruck während des Prozesses war 4Torr. Bei der Abscheidung wurde die Frequenz von 13,56MHz eingesetzt, und der Elektrodenabstand betrug 300mil (7,62mm). Die Schichten, die in diesem Abschnitt betrachtet werden, wurden bei einer Substrat-Temperatur von circa 275°C abgeschieden. Der mechanischen Spannung wurde gemäß der Stoney-Gleichung mit Wafer Geometry Gauge MX 208 der Fa.Eichhorn & Hausmann vermessen.



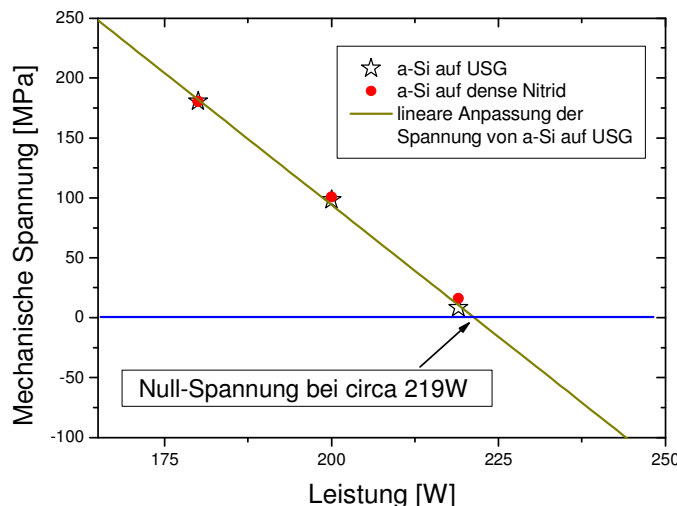
**Abbildung 6.9:** Mechanische Spannung von a-Si, das auf siliziumreichem PECVD Nitrid abgeschieden wurde, in Abhängigkeit zur elektrischen Leistung bei der Abscheidung.

Abbildung 6.9 zeigt die mechanische Spannung des auf siliziumreichem Nitrid abgeschiedenen amorphen Siliziums in Abhängigkeit von der elektrischen Leistung bei der Abscheidung. Die mechanische Spannung nimmt linear mit der Zunahme der Leistung ab. Eine lineare Anpassung an die mechanische Spannung ist ebenfalls in der Abbildung 6.9 dargestellt. Es ist zu kennen, der Nullpunkt der

Spannung bei circa 220W liegt. Der negative Wert der Spannung entspricht einer Druckspannung, während der positive Wert einer Zugspannung entspricht. Die mechanische Spannung kann durch die Plasma-Leistung gut eingestellt und zweckmäßig in den Zugspannungs- oder Druckspannungs-Bereich gelegt werden.

In Abbildung 6.10 wird die mechanische Spannung von a-Si Schichten, die auf USG beziehungsweise siliziumreichem Nitrid abgeschieden wurden, gemeinsam aufgetragen. Diese Schichten wurden in einem Durchlauf abgeschieden. Es ist zu erkennen, dass es keinen Unterschied zwischen der mechanischen Spannung der auf USG oder Nitrid abgeschiedenen Schicht gibt. Die mechanische Spannung von a-Si hängt nicht vom unterliegenden Material ab. Dieser Fall ist anders als bei der PECVD-Abscheidung von SiGe oder Ge (siehe Abschnitt 6.1.2), bei der die mechanische Spannung der Schicht eine deutliche Abhängigkeit zum unterliegenden Material zeigt.

Für die Herstellung der a-Si Druckdosen-Teststruktur wurde der modifizierte Druckdosen-Prozess, der in Abschnitt 7.1.1 beschrieben wird, verwendet. A-Si für die offene Membran wurde mit einer elektrischen Leistung von 180W abgeschieden. Aus Abbildung 6.9 ist zu erkennen, dass bei dieser Leistung die a-Si Schicht eine Zugspannung von circa 160MPa besitzt. Diese Spannung kann garantieren, dass sich die offene Membran nach Entfernung der Opferschicht leicht nach unten biegt. Dieses bei 180W abgeschiedene a-Si wird zum Vereinfachen als a-Si-A bezeichnet.



**Abbildung 6.10:** Mechanische Spannung von a-Si, die auf USG und siliziumreichem Nitrid abgeschieden wurde, in Abhängigkeit zur elektrischen Leistung bei der Abscheidung.

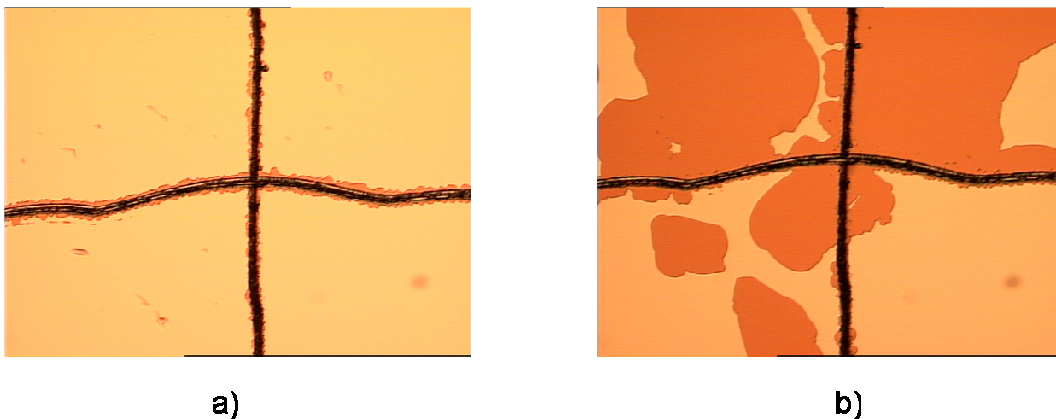


### 6.1.3.2 Haftungstests von a-Si-A auf Siliziumnitrid

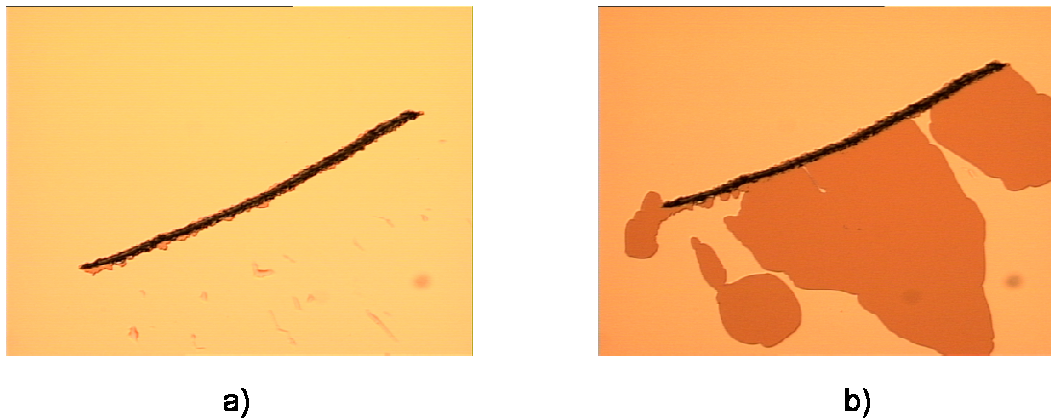
Für die Herstellung der offenen Membran soll a-Si-A auf Siliziumnitrid abgeschieden werden. Die Haftung von a-Si-A auf Siliziumnitrid wurde mit der in Abschnitt 0 beschriebenen Klebe-Methode qualitativ untersucht. Das Ergebnis des Klebe-Tests ist vergleichbar mit dem Ergebnis von SiGe-A und SiGe-B (Abschnitt 0), d.h., dass a-Si-A auf Siliziumnitrid gut haftet.

Nachdem a-Si-A auf Siliziumnitrid in der Atmosphäre bei Raumtemperatur für 2 Jahre und 5 Monate gelagert wurde, wurde der Klebe-Test wieder an diesem Material durchgeführt. Es zeigte sich, dass nicht nur die Haftung des Materials auf Siliziumnitrid sehr schlecht, sondern auch das Material sehr zerbrechlich geworden war.

Abbildung 6.11 und Abbildung 6.12 zeigen jeweils den „Klebe-Test“ mit einem Kreuz und einer Linie. Nachdem die Klebe von a-Si-A Schicht wieder abgezogen wurde, wurde an vielen Bereichen a-Si Abplatzungen mit großer Fläche beobachtet. Das bedeutet, dass sich die Qualität der a-Si-A Schicht nach Lagerung von mehr als zwei Jahren stark verschlechtert hat. Wenn dieses Material für Druckdosen-Membranen verwendet wird, muss eine gute Passivierungsschicht eingesetzt werden. Die Verschlechterung stammt wahrscheinlich aus der Ausgasung der a-Si-A Schicht und ihrer Absorption von Wasser aus der Luft.



**Abbildung 6.11:** „Klebe-Test“ mit Kreuz für a-Si-A-Schicht auf Siliziumnitrid. a) mikroskopische Aufnahme vor dem Klebe-Test; b) mikroskopische Aufnahme nach dem Klebe-Test.



**Abbildung 6.12:** „Klebe-Test“ mit Linie für a-Si-A-Schicht auf Siliziumnitrid. a) mikroskopische Aufnahme vor dem Klebe-Test; b) mikroskopische Aufnahme nach dem Klebe-Test.

## 6.2 Materialien für die Verschlusschicht

Für das Verschließen der SiGe-, Ge- und a-Si-Druckdosen wurden entsprechendes SiGe-, Ge- und a-Si-Material geplant. In dieser Arbeit wurden SiGe- und Ge-Druckdose erfolgreich verschlossen.

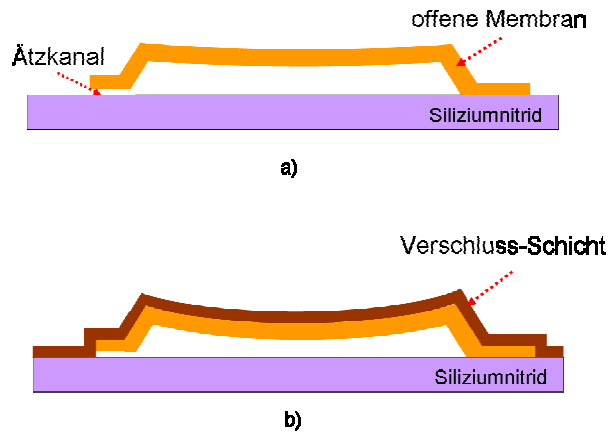
In diesem Abschnitt werden zuerst die Verschlusschicht für die SiGe- und Ge-Druckdose und danach die geplante Verschlusschicht für a-Si Druckdose nacheinander diskutiert.

### 6.2.1 Materialien der Verschlusschicht der SiGe- und Ge-Druckdose

In der vorliegenden Arbeit wurden Druckdosen aus SiGe und Ge hergestellt. Das Hauptziel ist die experimentelle Verifizierung der Ausführbarkeit des Konzeptes einer kapazitiven Druckdose mit SiGe- und Ge-Membran. Dabei sind die mechanischen Eigenschaften der Membran besonders interessant. Es ist sinnvoll, die ganze Membran durch SiGe für den Fall SiGe-Druckdose, oder durch Ge beim Fall Ge-Druckdose zu produzieren. Für den Verschluss der Druckdosen wurden SiGe (für SiGe-Druckdose) und Ge (für Ge-Druckdose) eingesetzt, die mit CVD abgeschieden wurden, da die durch CVD abgeschiedenen Materialien sehr konform und dicht sind. Außerdem wurden Druckdosenverschlüsse aus durch PECVD abgeschiedenem SiGe oder Ge untersucht.

In diesem Abschnitt wird zuerst der Versuch mit Verschlusschicht aus dem PECVD-Material diskutiert, und das zweite Thema ist die Verschlusschicht aus CVD SiGe oder CVD Ge.

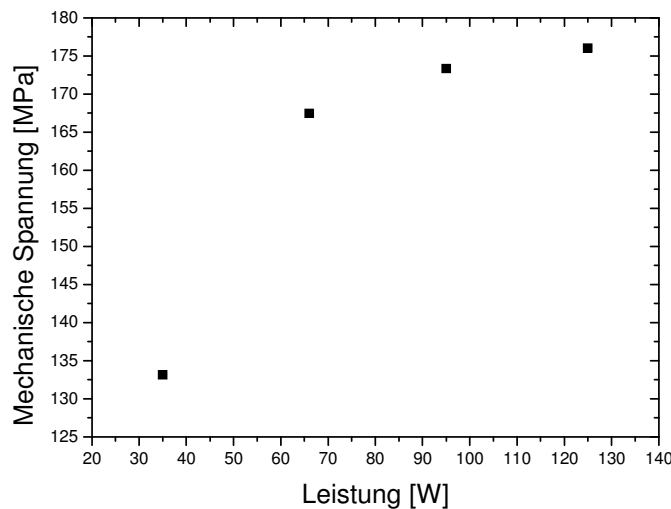
### 6.2.1.1 Versuch mit der Verschlusschicht aus dem PECVD Material



**Abbildung 6.13:** Erwünschter Fall, in dem die offene Membran und die Verschluss-Schicht eine Zugspannung besitzen, und die Zugspannung der Verschluss-Schicht größer ist. a) Membran schon strukturiert, allerdings noch nicht verschlossen; b) Verschlusschicht abgeschieden, und Druckdose verschlossen.

In dieser Arbeit wurden kapazitive Druckdosen mit CVD SiGe oder CVD Ge verschlossen. Zudem wurde untersucht, ob auch mit PECVD Materialien ein Verschließen möglich ist. Dabei wurde zuerst eine offene Membran aus Poly-Ge hergestellt, die mit PECVD abgeschieden und mit RIE (*Reactive ion etching*) strukturiert wurde. Danach wurden versucht, die Ätzkanäle unter der Membran mit PECVD Ge zu verschließen.

Da die Verschluss-Schicht über der Membran liegt, spielt ihre mechanische Spannung eine wichtige Rolle für die Form der fertigen Druckdose. Im Idealfall sollen beide Schichten, die Membran und die Verschluss-Schicht, spannungsfrei sein. Da es allerdings unmöglich ist, völlig spannungsfreie Schichten zu erzeugen, sollen im realistischen Fall beide Schichten eine Zugspannung haben. Außerdem soll die Zugspannung der Verschluss-Schicht größer als die der unterliegenden offenen Membran sein. Auf diese Weise kann garantiert werden, dass sich die Membran der Druckdose nach dem Verschluss der Druckdose ohne Druckbelastung leicht nach unten biegt. So kann vermieden werden, dass ein Buckel der Membran nach oben gebildet wird, was zu einer Reduzierung der Kapazität führt. Abbildung 6.13 zeigt den erwünschten realistischen Fall der Druckdose mit geeigneter mechanischer Spannung der offenen Membran und der Verschluss-Schicht.



**Abbildung 6.14:** Mechanische Spannung der Poly-Ge Schicht, die auf Ge-A durch PECVD-Verfahren mit verschiedenen Leistungen abgeschieden wurde.

Poly-Ge Schichten mit verschiedenen Plasma-Leistungen wurden mit PECVD auf Dummy Wafer mit vorab abgeschiedenem Ge-A abgeschieden. Nach der Strukturierung der offenen Membran besetzt der Siliziumnitrid Bereich nur circa 1,5% der Waferoberfläche, und 98,5% ist vom Membran-Material bedeckt. Deswegen wurden die Tests der mechanischen Spannung der Verschluss-Schicht auf einem Ge-A Dummy anstatt einem Siliziumnitrid Dummy durchgeführt. Mit der Variation der Leistungen könnte die mechanische Spannung der Poly-Ge Schichten verändert werden. Die Gaszusammensetzung entsprach dabei UGV und die Substrat-Temperatur lag bei circa 340°C. Der Elektrodenabstand bei der Abscheidung betrug 369mil (9,3726mm) und NGGFR war 1,5.

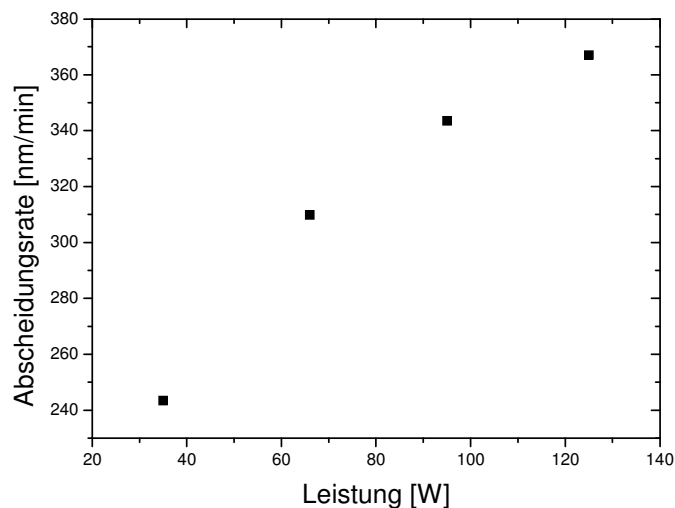
In Abbildung 6.14 ist die mechanische Spannung der auf Ge-A abgeschiedenen Poly-Ge Schicht gegen die Plasma-Leistung aufgetragen. Die mechanische Spannung ist positiv und handelt sich folglich um eine Zugspannung. Sie steigt mit der Zunahme der Leistung, von 133MPa bei 25W bis 176MPa bei 125W. Ab 66W ist eine Tendenz zur Sättigung der mechanischen Spannung zu erkennen. Die mechanische Spannung aller Schichten liegt über 130MPa. Da Ge-A eine mechanische Spannung von ungefähr 108MPa besitzt, erfüllen alle in Abbildung 6.14 umfassten Schichten die erwünschte Bedingung, dass die Spannung in der Verschluss-Schicht größer als die der offenen Membran ist. Deswegen können theoretisch alle diese Schichten für den Verschluss der Druckdose verwendet werden.

**Tabelle 6.3:** Definition der Kürzel der PECVD Ge-Materialien, die über PECVD Ge abgeschieden werden.

Kürzel des Materials	SGe-A	SGe-B	SGe-C	SGe-D
Leistung [W]	35	66	95	125
Mechanische Spannung [MPa]	133	167	173	176

Zum Vereinfachen werden die in Abbildung 6.14 umfassten Materialien mit Kürzeln bezeichnet, die in Tabelle 6.3 definiert werden.

Abbildung 6.15 zeigt die Abscheidungsrate der Poly-Ge Schicht. Mit wachsender Leistung nimmt die Abscheidungsrate zu, weil mit der Erhöhung der Leistung mehr Energie zu den Gasteilchen geführt wird, wodurch mehr Radikale erzeugt und zu der Waferoberfläche geliefert werden können [71]. Das bedeutet, dass die Abscheidung der Schicht unter den vorliegenden Depositionsparametern von der Zulieferung der Radikale und nicht von den Oberflächen-Reaktionen begrenzt wird.

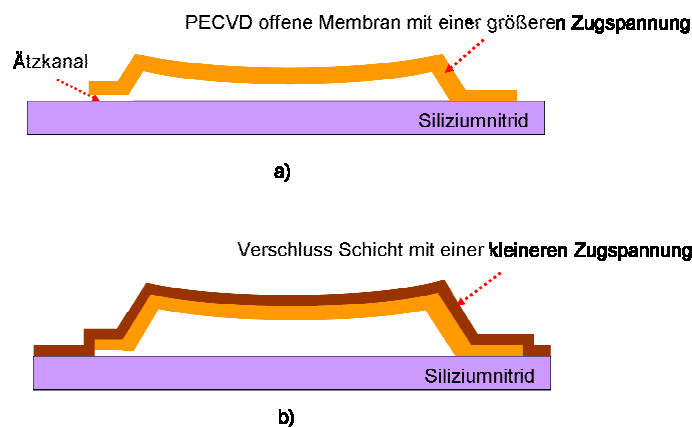


**Abbildung 6.15:** Abscheidungsrate der Poly-Ge Schicht, die auf Ge-A durch PECVD-Verfahren mit verschiedenen Leistungen abgeschieden wurde.

SGe-C wurde aufgrund seiner passenden Spannung und Abscheidungsrate für den Versuch eingesetzt, mit dem die Ausführbarkeit vom Verschließen der Druckdose mit einem PECVD Material untersucht wurde.

### 6.2.1.2 Eingesetzte CVD Verschlusschicht der SiGe- und Ge-Druckdose

Obwohl Vorbereitung auf die Verwendung von PECVD-Materialien als Verschluss-Schicht ausgeführt wurde, ist eine Verschluss-Schicht aus CVD-Materialien eine bessere Wahl. Die Abscheidung der CVD-Materialien ist konform. Außerdem sind CVD-Materialien dichter als PECVD-Materialien. Deswegen sind CVD-Materialien besonders für den Verschluss von engen Ätzkanälen geeignet.



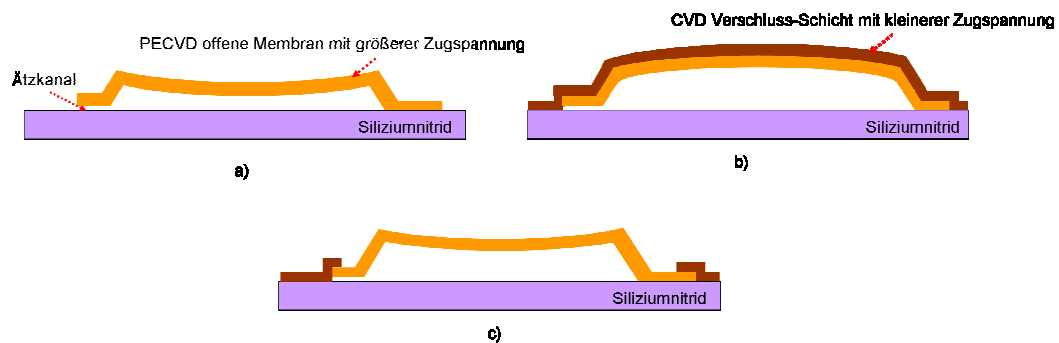
**Abbildung 6.16:** Der Fall, in dem die PECVD offene Membran eine größere Zugspannung und die Verschluss-Schicht eine kleinere Zugspannung besitzt. Weil die Verschluss-Schicht dünn genug ist, wird nach dem Verschluss kein Buckel nach oben erzeugt. a) Strukturierte offene Membran vor dem Verschluss der Ätzkanäle; b) Druckdose nach dem Verschluss.

Der Unterschied zwischen PECVD- und CVD-Abscheidung ist, dass bei der Letzteren kein Plasma in der Prozess Kammer gezündet wird. Die nötige Energie für die chemischen Reaktionen wird alleine vom Heizelement in der Prozesskammer zugeführt.

Die Gaszusammensetzung bei der Abscheidung entsprach USGV und UGV entsprechend für CVD-SiGe und CVD-Ge und der Elektrodenabstand betrug 369mil (9,37mm). Die Substrat-Temperatur lag bei circa 375°C und circa 340°C jeweils für CVD SiGe und CVD Ge.

Es wurde nur eine Sorte CVD SiGe und eine Sorte CVD Ge getestet. Da die CVD Abscheidung konform und dicht ist, kann die Druckdose mit einer relativ dünnen Schicht verschlossen werden. Deswegen ist die endgültige Form der Druckdose nicht so empfindlich gegen die mechanische Spannung der CVD-Verschluss-

Schicht wie gegen die der PECVD-Verschluss-Schicht. In dem in Abbildung 6.16 gezeigten Fall ist die Zugspannung in der offenen Membran groß, so dass die offene Membran vor dem Verschluss schon eine stark nach unten gerichtete Verbiegung aufweist. Die Zugspannung in der Verschluss-Schicht ist kleiner als die in der Membran. Da die Verschluss-Schicht dünn genug ist, wird nach dem Verschluss kein Buckel wegen der Spannungsgradienten in der Doppelschicht gebildet.



**Abbildung 6.17:** Der Fall, in dem die Zugspannung in der Verschluss-Schicht kleiner als die der offenen Membran ist und der Spannungsgradient in der Doppelschicht einen Buckel der Membran nach dem Verschluss der Druckdose erzeugt b). Im Anschluss wird die Verschluss-Schicht vom Mittelbereich der Membran weggeätzt und so der Buckel beseitigt c). a) Strukturierte offene Membran vor dem Verschluss der Ätzkanäle.

Weil die Öffnungen der Ätzkanäle sich am Rand der Druckdose befinden, kann die Verschlusschicht auf der Membran nach dem Verschluss der Druckdose durch RIE beseitigt oder gedünnt werden. Somit kann der Einfluss der mechanischen Spannung der Verschlusschicht auf die Form der Membran aufgehoben oder reduziert werden. Die schematische Darstellung dieses Falls ist Abbildung 6.17 zu entnehmen.

In Tabelle 6.4 werden die Abscheidungsparameter und Eigenschaften der beiden untersuchten CVD Materialien zusammengefasst. Die Charakterisierung der mechanischen Spannung der CVD SiGe wurde auf einem Dummy-Wafer mit vorab abgeschiedenen PECVD SiGe durchgeführt. Für die Messung der mechanischen Spannung von CVD Ge wurde dann ein Dummy-Wafer mit vorab abgeschiedenem PECVD Ge verwendet. Die spezifischen Widerstände der beiden Materialien wurden auf einem Dummy-Wafer mit vorab abgeschiedenem Siliziumnitrid gemessen. Die Charakterisierung des Elastizitätsmoduls der beiden Materialien erfolgte per Nanoindentierungsverfahren an einer 1500nm dicken Schicht.

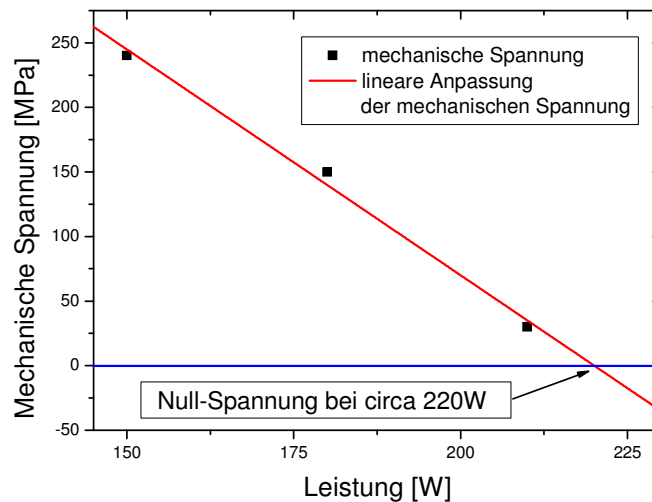
**Tabelle 6.4:** CVD Verschluss-Schicht für den Verschluss der Druckdose.

Kürzel	CVD-SiGe-A	CVD-Ge-A
Material	CVD SiGe	CVD Ge
Gaszusammensetzung	USGV	UGV
NGGFR	0,25	0,25
Substrat-Temperatur [°C]	375	340
Elektrodenabstand [mm]	9,37	9,37
Mechanische Spannung [MPa]	65	204
spezifischer Widerstand [mΩ -cm]	4,5	2,4
Verhältnis Si:Ge	18%:82%	0%:100%
Elastizitätsmodul [GPa]	141	146

### 6.2.2 Materialien der Verschlusschicht der a-Si-Druckdose

Als der erste Schritt der Entwicklung an der a-Si Druckdose wurde die Herstellung einer verschlossenen Druckdose mit einer a-Si Membran (ohne eine eingebettete leitfähige Schicht und eine Passivierungsschicht) geplant. Um solch eine Druckdose herzustellen, soll eine offene a-Si Membran mit einer a-Si Verschlusschicht verschlossen werden. Da CVD Abscheidung von a-Si bei Substrattemperaturen, die niedriger als 450°C sind, unmöglich ist, wurde nur die PECVD Abscheidung der a-Si Verschlusschicht untersucht.





**Abbildung 6.18:** Mechanische Spannung von a-Si, die auf a-Si abgeschieden wurde, in Abhängigkeit zur elektrischen Leistung bei der Abscheidung.

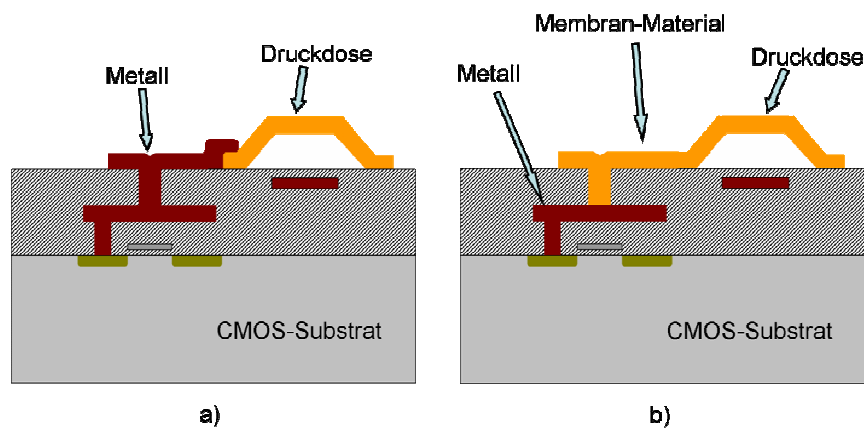
Die Abscheidungsversuche wurden auf Dummy-Wafer mit dem vorab abgeschiedenen a-Si durchgeführt. Somit konnte die mechanische Spannung der a-Si Schicht, die auf a-Si abgeschieden wird, untersucht werden. Die Abscheidung wurde wie bei den Abscheidungsversuchen für die offene Membran aus a-Si auch mit der *Precision 5000* durchgeführt. Dabei sind die Gasquellen, die Gaszusammensetzung, der Gasfluss, der Kammer-Druck, die Frequenz der elektrischen Quelle, der Elektrodeabstand und die Substrattemperatur gleich denjenigen bei den Abscheidungsversuchen für die Materialien der a-Si offenen Membran (siehe Seite 95).

Die mechanische Spannung der a-Si Schicht, die auf a-Si abgeschieden wurde, wird in Abhängigkeit von der elektrischen Leistung in Abbildung 6.18 aufgetragen. Dabei wird eine lineare Anpassung auch gezeigt. Der Null-Punkt der Spannung liegt wie die a-Si Schicht auf USG oder Nitrid auch bei circa 220W. Die mechanische Spannung der a-Si Schicht auf a-Si unterscheidet sich kaum von der der a-Si Schicht auf USG oder Nitrid.

Da das Material für die offene a-Si-Membran a-Si-A eine Zugspannung von circa 160MPa besitzt, wurde das a-Si Material, das bei einer elektrischen Leistung von 150W abgeschieden wird, als die Verschlussschicht für das geplante Verschließen der Druckdose ausgewählt. Dieses Material hat eine Zugspannung von circa 240MPa. Es wird als S-a-Si-A bezeichnet.

### 6.3 Herstellung und Untersuchung der SiGe- und Ge-Durchkontaktierung auf der unterliegenden Metall-Ebene

Bei der Integration der Druckdosen mit der unterliegenden CMOS-Schaltung müssen elektrische Verbindungen zwischen den beiden Elementen gebildet werden. Abbildung 6.19 zeigt zwei Ansätze für solche Verbindungen. Bei dem klassischen monolithischen Ansatz wird der MEMS-Prozess mit dem CMOS-Prozess vermischt. Es werden zuerst alle Hochtemperatur-Prozesse ausgeführt. Anschließend folgen die Metall-Verbindungen zwischen den verschiedenen Teilen des Systems (inklusive der Verbindung zwischen den Druckdosen und den Schaltungen). Prozesse mit Temperaturen größer als  $450^{\circ}\text{C}$  verursachen Degeneration der Metall-Bahnen, die typischerweise aus Aluminium sind. Als Beispiel sei die Aktivierung der Implantation von Poly-Silizium genannt, das als Membran-Material bei der herkömmlichen Herstellung der kapazitiven Druckdose dient und typischerweise bei einer Temperatur von circa  $1000^{\circ}\text{C}$  durchgeführt wird. Da Poly-SiGe und -Ge bei Temperaturen niedriger als  $450^{\circ}\text{C}$  abgeschieden werden können und durch eine in-situ Dotierung diese Materialien elektrisch sehr gut leitfähig sind, können diese Materialien direkt auf geöffneten Metall-Pads abgeschieden und dadurch eine elektrische Verbindung zwischen Druckdosen und der Schaltung bilden. (Abbildung 6.19 b)) [85]. Im Vergleich mit dem herkömmlichen Ansatz können mehrere Prozess-Schritte mit diesem neuartigen Ansatz gespart werden.



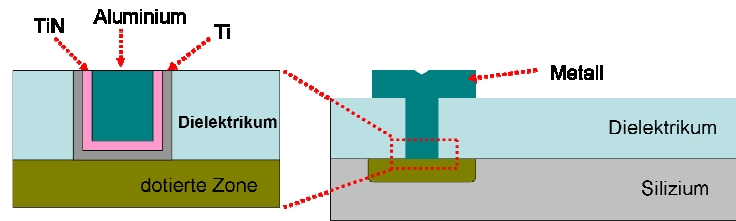
**Abbildung 6.19:** Klassischer Ansatz für die elektrische Verbindung zwischen den Druckdosen und der unterliegenden CMOS Schaltung a) und neuartiger Ansatz, wobei das Membran Material direkt auf geöffneten Pads abgeschieden wird, und dadurch Durchkontaktierungen aus dem Membran Material gebildet werden b).

In Tabelle 6.5 werden die notwendigen Schritte von der Strukturierung der Opferschicht der Druckdose bis zur Fertigstellung der elektrischen Verbindung bei den beiden Ansätzen zusammengefasst. Mit dem neuartigen Ansatz können die Schritte Abscheidung und Strukturierung der Metall-Schicht gespart, und außerdem eine Fotolithografie-Ebene weggelassen werden.

Um die Ausführbarkeit des neuartigen Ansatzes zu überprüfen, wurden Durchkontaktierungen aus den in dieser Promotionsarbeit verwendeten Membran-Materialien, nämlich SiGe-A, SiGe-B und Ge-A, hergestellt, und charakterisiert [86]. Wenn Metall, zum Beispiel Aluminium, direkt mit Silizium in Kontakt gebracht wird, kann *spiking* wegen der Diffusion vom Silizium in das Metall verursacht werden [87][88][89]. Das kann zu Ausfällen der Bauelemente führen. Normalerweise wird zwischen dem Metall und dem Poly-Silizium ein Dünnschicht von Titannitrid eingefügt, der als Diffusionsbarriere dient. So kann *spiking* effektiv vermieden werden. Jedoch haftet das Silizium nicht gut auf dem Titannitrid. Eine übliche Methode ist, zwischen dem Silizium und Titannitrid noch einen Dünnschicht von Titan zu legen. Außerdem können Titan und Silizium in einem Temperprozess Silizid bilden, und damit die Haftung zwischen den beiden Materialien verbessern und den Kontakt-Widerstand reduzieren.

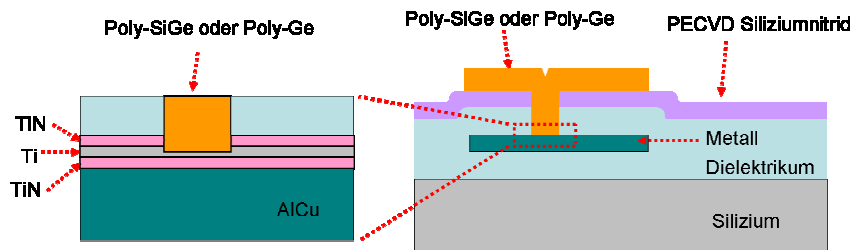
**Tabelle 6.5:** Vergleich der notwendigen Schritte beim herkömmlichen und neuartigen Ansatz für die Verbindung zwischen Druckdosen und der unterliegenden Schaltung.

Schritt	Herkömmlicher Ansatz	Membran-Material direkt auf Metall-Pads
1	Opferschicht strukturieren	Opferschicht strukturieren
2	Membran-Material abscheiden	Metall Pads öffnen
3	Membran strukturieren	Membran-Material abscheiden
4	Opferschicht wegätzen	Membran strukturieren
5	Verschluss-Schicht abscheiden	Opferschicht wegätzen
6	Verschluss-Schicht strukturieren	Verschluss-Schicht abscheiden
7	Metall Pads öffnen	Verschluss-Schicht strukturieren
8	Metall abscheiden	
9	Metall strukturieren	



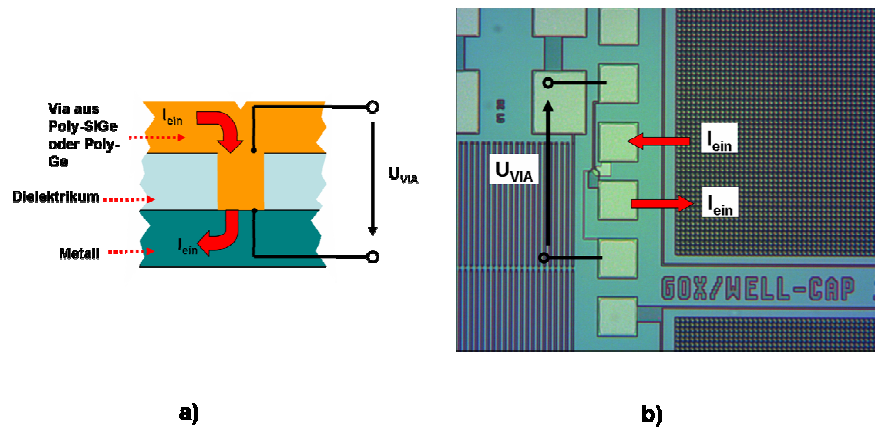
**Abbildung 6.20:** Schematische Darstellung einer Aluminium Durchkontaktierung auf Silizium mit TiN Barriere und Ti Zwischenschicht.

Abbildung 6.20 zeigt eine schematische Darstellung einer üblichen Aluminium-Durchkontaktierung auf Silizium mit einer TiN Barriere und einer Ti-Zwischenschicht. Aluminium kann auch in Poly-SiGe oder Poly-Ge diffundieren [90]. Bei der Herstellung der Durchkontaktierung aus Poly-SiGe oder Poly-Ge müssen ebenfalls eine Barriere und eine Zwischenschicht eingesetzt werden. Da in diesem Fall Poly-SiGe oder -Ge auf Metall (umgekehrte Reihenfolge der Schichten im Vergleich zu der herkömmlichen Durchkontaktierung) abgeschieden werden, wurde in dieser Arbeit ein umgekehrtes Barriere-System entworfen und verwendet.



**Abbildung 6.21:** Schematische Darstellung der Durchkontaktierung aus Poly-SiGe oder Poly-Ge mit Ti Zwischenschicht und TiN Barriere.

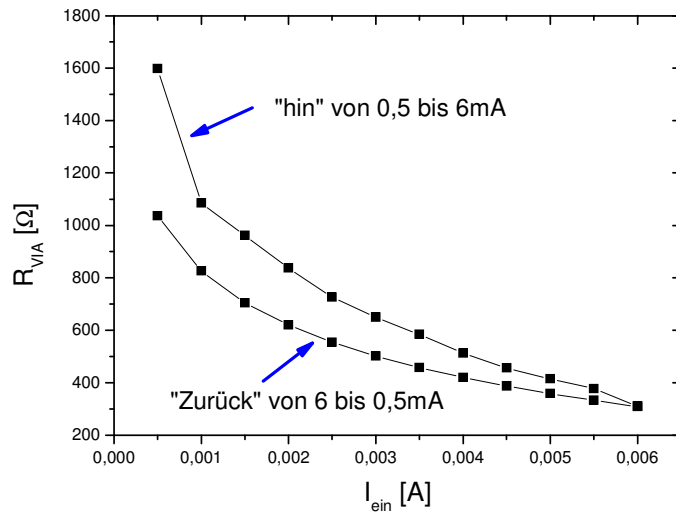
In Abbildung 6.21 wird eine schematische Darstellung der in dieser Arbeit hergestellten SiGe- oder Ge-Durchkontaktierung dargestellt. An der Stelle, wo Poly-SiGe oder -Ge mit Metall in Kontakt gebracht wurde, wurde ein Schichtstapel aus TiN (100nm), Ti (100nm) und TiN (100nm) über einer AlCu(0,5%)-Schicht abgeschieden. Die oberste TiN Schicht diente hierbei als eine Antireflexschicht bei der Belichtung in Lithographie für die Strukturierung der Metallschicht. Die Ti-Schicht diente der guten Haftung vom Poly-SiGe oder -Ge auf Metall und die untere TiN Schicht stellte die Diffusionsbarriere dar. Öffnungen zum Metall wurden durch ein Zwischendielektrikum mit einem RIE-Verfahren freigeätzt. In diesen Öffnungen wurden danach Poly-SiGe oder -Ge in einem PECVD-Verfahren abgeschieden. Das RIE-Ätzen erreichte wie geplant die Ti-Schicht. Damit konnte die Poly-SiGe- oder -Ge-Schicht in direkten Kontakt mit der mittleren Ti-Schicht treten. Die Durchkontaktierung hat einen quadratischen Querschnitt mit einer Nominalkantenlänge von 1,2µm. Die Nominalhöhe der Durchkontaktierung beträgt 900nm.



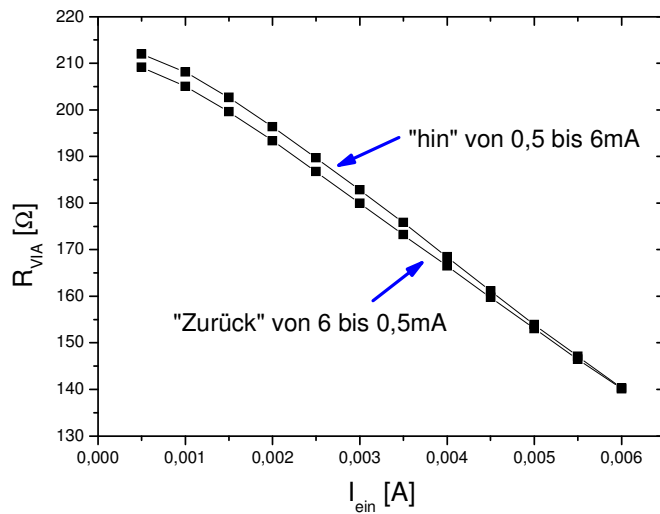
**Abbildung 6.22:** Schematische Darstellung zur Charakterisierung des Widerstandes einer Poly-SiGe oder Poly-Ge Durchkontaktierung a) und die Aufsicht der fertigen Kelvin Struktur. Der eingepreßte Strom  $I_{ein}$  und die zum messenden Spannung  $U_{VIA}$  werden in a) und b) markiert.

Um den Widerstand einer mit Poly-SiGe oder -Ge gefüllten Durchkontaktierung zu bestimmen, wurden so genannte Kelvin Strukturen hergestellt. Abbildung 6.22 a) zeigt die schematische Darstellung des Charakterisierungsverfahrens zur Bestimmung des Widerstandes einer Durchkontaktierung. Ein Strom  $I_{ein}$  wird durch die Durchkontaktierung eingepreßt und gleichzeitig wird der Spannungsabfall  $U_{VIA}$  über den beiden Enden der Durchkontaktierung gemessen. Der Widerstand der Durchkontaktierung  $R_{VIA}$  wird mit  $R_{VIA} = U_{VIA} / I_{ein}$  gerechnet. In Abbildung 6.22 b) wird die Aufsicht einer fertigen Kelvin-Struktur dargestellt, wobei die vier Pads der Kelvin-Struktur ihrer Funktionen zugeordnet werden.

Die Durchkontaktierungen wurden mit SiGe-A, SiGe-B und Ge-A hergestellt. Bei einigen Wafern wurde ein in-situ Sputter-Schritt mit Ar-Plasma vor der Poly-SiGe- oder -Ge-Abscheidung auf Metall eingeführt. Somit wurde erwartet, dass das natürliche Oxid auf der Oberfläche des Metalls durch den Ar-Ionen-Beschuss weggesputtert, und damit die elektrische Kontaktierung zwischen Poly-SiGe oder -Ge und dem Metall verbessert werden kann. Das Plasma für das in-situ Sputtern wurde mit einer Frequenz von 345kHz betrieben. Bei dieser Frequenz (zum Vergleich mit der Frequenz von 13,56MHz) können die Ionen im Plasma dem wechselnden elektromagnetischen Feld effektiv folgen und damit kinetische Energien vom wechselnden elektromagnetischen Feld bekommen (siehe Seite 29). Somit kann die Wafer-Oberfläche mit Ar-Ionen drastisch beschossen werden und ein Abtrag eines dünnen Materialfilms (in diesem Fall des natürlichen Oxids) von der Wafer-Oberfläche wird erreicht. Der Widerstand der Durchkontaktierung wurde mit dem oben erwähnten Messverfahren charakterisiert.



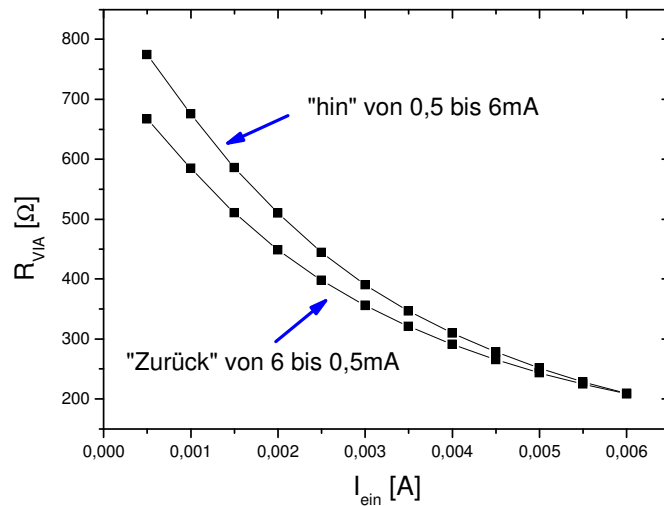
**Abbildung 6.23:** Widerstand der Durchkontaktierung bestehend aus SiGe-A in Abhängigkeit vom eingeprägten Strom.



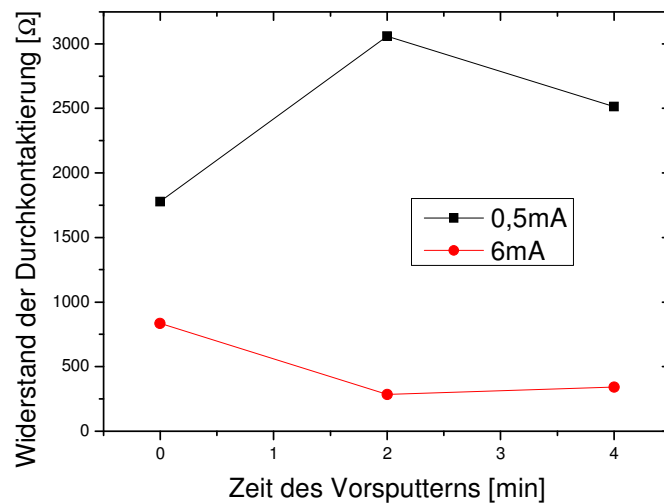
**Abbildung 6.24:** Widerstand einer SiGe-B Durchkontaktierung in Abhängigkeit vom eingeprägten Strom.

Bei der Messung wurde der Strom  $I_{\text{ein}}$  zuerst von 0,5mA bis 6mA, und anschließend von 6mA wieder zurück nach 0,5mA eingeprägt. Auf jedem Wafer wurden Messungen an 9 gleichmäßig verteilten Messstellen vorgenommen. In Abbildung 6.23, Abbildung 6.24 und Abbildung 6.25 sind die Messergebnisse einer SiGe-A, SiGe-B und Ge-A Durchkontaktierung als Beispiel dargestellt. Diese Messergeb-

nisse wurden bei den Wafern ohne in-situ Ar-Vorsputtern vor der SiGe- oder Ge-Abscheidung aufgenommen.



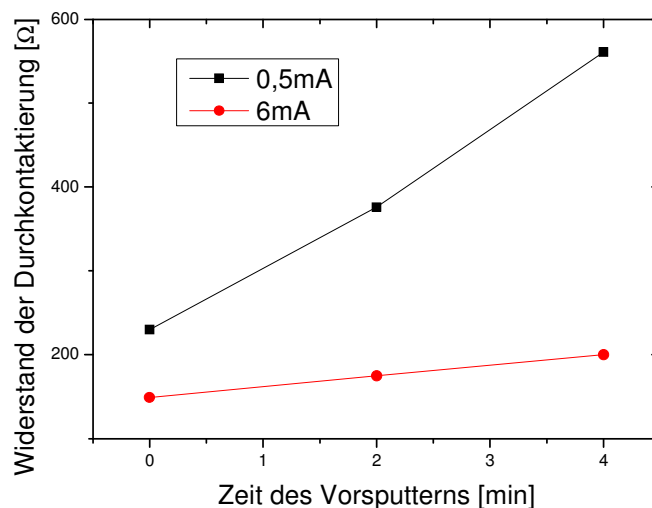
**Abbildung 6.25:** Widerstand einer Ge-A Durchkontaktierung in Abhängigkeit vom eingprägten Strom.



**Abbildung 6.26:** Gemittelter Widerstand der SiGe-A Durchkontaktierung bei  $I_{\text{ein}}=0,5\text{mA}$  und  $I_{\text{ein}}=6\text{mA}$  in Abhängigkeit der Zeit des in-situ Ar-Vorsputterns.

Aus allen drei Abbildungen ist zu erkennen, dass der Widerstand verschiedener Durchkontaktierungen mit zunehmendem Strom sinkt, unabhängig von den verwendeten Materialien. Darüber hinaus sind die erhaltenen Messwerte beim Rück-

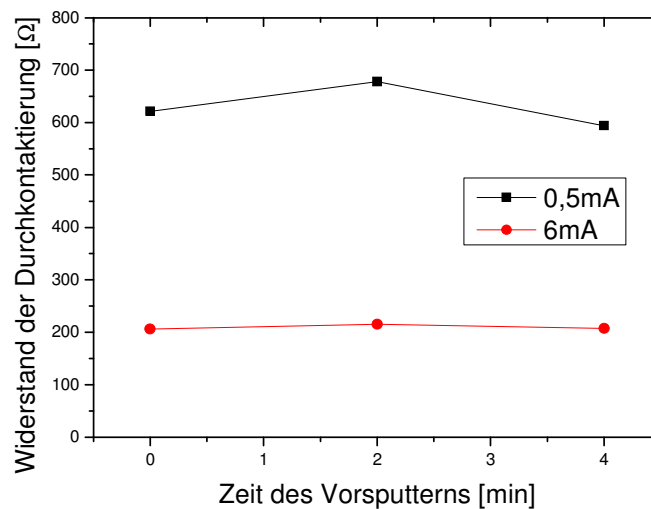
wärtsabtasten (von 6 bis 0,5mA) immer kleiner als die beim Vorwärtsabtasten (von 0,5 bis 6mA). Diese Effekte deuten eine Temperatur-Abhängigkeit an. Aufgrund der Kurve in Abbildung 6.24 kann, zum Beispiel, die Verlustleistung in der Durchkontaktierung bei  $I_{ein}=6mA$  zu  $3,9 \times 10^{12} \text{ mW}/(\text{cm})^3$  berechnet werden. Je größer der eingeprägte Strom ist, desto höher ist die aufgrund der erhöhten Verlustleistung entstehende Temperatur in der Durchkontaktierung. Aus den Messergebnissen des Widerstandes der Durchkontaktierung ist es zu erkennen, dass die drei Materialien, nämlich SiGe-A, SiGe-B und Ge-A, negative Temperaturkoeffizienten des elektrischen Widerstandes (*temperature coefficient of electrical resistance*, TCR) besitzen. Diese negative TCR führt dazu, dass der Widerstand der Durchkontaktierung mit wachsendem eingepprägtem Strom abnimmt, und der Widerstand beim Rückwärtsabtasten im Vergleich mit den Messwerten aus Vorwärtsabtasten sinkt.



**Abbildung 6.27:** Gemittelter Widerstand der SiGe-B Durchkontaktierung bei  $I_{ein}=0,5mA$  und  $I_{ein}=6mA$  in Abhängigkeit der Zeit des in-situ Ar-Vorsputterns.

Abbildung 6.26, Abbildung 6.27 und Abbildung 6.28 zeigen den gemittelten Widerstand der Durchkontaktierung jeweils aus SiGe-A, SiGe-B und Ge-A in Abhängigkeit von der Zeit des in-situ Ar-Vorsputterns. Der Widerstand der SiGe-A Durchkontaktierung liegt bei  $I_{ein}=0,5mA$  zwischen  $1,7k \Omega$  und  $3k \Omega$ , während der Widerstand bei  $I_{ein}=6mA$  einen Wert zwischen  $280 \Omega$  und  $800 \Omega$  annimmt. Keine klare Auswirkung zeigt die Zeit des Vorsputterns auf den Widerstand der SiGe-A Durchkontaktierung. Anhand einer REM Aufnahme ist zu erkennen, dass bei der Abscheidung von SiGe-A eine dünne Schicht mit amorphem Anteil am Anfang des Wachstums der Schicht vorhanden ist. Diese dünne Schicht hat einen relativ hohen und ungleichmäßigen spezifischen Widerstand, was zur Zufälligkeit des Widerstandes der SiGe-A Durchkontaktierung führt.





**Abbildung 6.28:** Gemittelter Widerstand der Ge-A Durchkontaktierung bei  $I_{\text{ein}}=0,5\text{mA}$  und  $I_{\text{ein}}=6\text{mA}$  in Abhängigkeit der Zeit des in-situ Ar-Vorsputterns.

Der Widerstand der SiGe-B Durchkontaktierung ist niedriger als der der SiGe-A Durchkontaktierung, da die dünne Schicht mit amorphem Anteil in SiGe-B nicht existiert. Der Widerstand der SiGe-B Durchkontaktierung liegt bei einem eingepprägten Strom von  $0,5\text{mA}$  zwischen  $230\ \Omega$  und  $560\ \Omega$ . Bei  $I_{\text{ein}}=6\text{mA}$  ist der Widerstand viel kleiner und befindet sich im Bereich zwischen  $150\ \Omega$  und  $200\ \Omega$ . Der spezifische Widerstand der SiGe-B Durchkontaktierung steigt mit der zunehmenden Zeit des in-situ Ar-Vorsputterns. Das deutet darauf hin, dass der für Reduzierung des Kontakt-Widerstandes geplante Vorsputtern eine umgekehrte Wirkung aufzeigt. Da fast ausschließlich die ganze Wafer-Oberfläche beim Ar-Vorsputtern mit Siliziumnitrid bedeckt, werden auch viele Moleküle oder Moleküle-Segmente vom Siliziumnitrid beim Sputtern mitweggesputtert werden. Diese Materialien lagern sich wiederum auf der ganzen Wafer-Oberfläche inklusive der Öffnungen zum Metall ab und verhindern somit den elektrischen Kontakt zwischen dem Poly-SiGe und dem Metall, was gleichzeitig die Zunahme des Widerstandes der SiGe-B Durchkontaktierung bewirkt. Das bedeutet, dass das in-situ Ar-Sputtern in diesem Fall kein geeignetes Verfahren für die Beseitigung des natürlichen Metall-Oxides darstellt.

Der Widerstand der Ge-A Durchkontaktierung (Abbildung 6.28) weist bei einem Strom von  $I_{\text{ein}}=0,5\text{mA}$  einen Wert von  $630\ \Omega$  auf. Bei einem Strom von  $I_{\text{ein}}=6\text{mA}$  beträgt der Widerstand ungefähr  $210\ \Omega$ . Es scheint keinen signifikanten Einfluss von der Zeit des Vorsputterns auf den Widerstand der Ge-A Durchkontaktierung zu geben. Eine mögliche Erklärung hierfür könnte darin liegen, dass der Kontakt-Widerstand zwischen Ge-A und dem Metall so klein ist, dass der Beitrag des Kon-

takt-Widerstandes zum Gesamtwiderstand der Durchkontaktierung vernachlässigt werden kann.

Neben dem oben erläuterten, vereinfachten Prozessablauf, gibt es noch einen weiteren Vorteil. So ist es möglich einen höheren Strom, als bei den standardmäßig mit Al gefüllten Durchkontaktierungen, einzuprägen. So kann in einer Durchkontaktierung, die mit einem Metall gefüllt wurde, bei höheren Strömen Elektromigration auftreten. Als Beispiel, liegt bei einem standardmäßigen CMOS Prozess der typische maximal erlaubte Strom für die Charakterisierung des Widerstandes einer Durchkontaktierung mit ähnlichen Dimensionen wie die der oben erwähnten Poly-SiGe oder -Ge gefüllten Durchkontaktierung, zwischen 1mA und 2mA. Zum Vergleich, beträgt der hier maximal verwendete Strom 6mA, wonach die gemessenen Durchkontaktierungen immer noch sehr gut funktionierten.

Trotz der oben aufgezählten wesentlichen Vorteile, gibt es auch einen Nachteil der Poly-SiGe und -Ge gefüllten Durchkontaktierungen. Der Widerstand der hier betrachteten Durchkontaktierung ist im Vergleich mit dem der Metall-Durchkontaktierung viel größer. Ein üblicher Widerstand einer Metalldurchkontaktierung mit ähnlichen Dimensionen beträgt circa  $200\text{ m}\Omega$  bei einem Strom von 1mA, während der entsprechende Widerstand der hier hergestellten Durchkontaktierung zwischen  $200\Omega$  und  $1000\Omega$  liegt. Eine Reduzierung des Widerstandes kann durch die Vergrößerung des Querschnitts der Durchkontaktierung oder einen zusätzlichen Temper-Schritt realisiert werden.

Der Strom, der durch die Durchkontaktierung fließt, ist beim Normalbetrieb der elektrischen Schaltung sehr gering. Ein typischer maximaler Strom beim Betrieb durch eine Durchkontaktierung mit den oben erzählten Dimensionen ist 0,125mA. Bei solch einem kleinen Strom gibt es keine deutliche Temperatur-Erhöhung der Durchkontaktierung. Deswegen ist die Temperatur-Abhängigkeit der Poly-SiGe oder -Ge Durchkontaktierung in diesem Fall nicht drastisch.

### 6.4 Zusammenfassung

Materialien für die offene Membran und die Verschlusschicht der SiGe-, Ge- und a-Si-Druckdose wurden ausgesucht. Die Materialien für die offene Membran werden mittels des PECVD-Verfahrens abgeschieden. Bei dem Aussuchen dieser Materialien wurden besonders auf die mechanische Spannung dieser Materialien geachtet, da die mechanische Spannung die Form der offenen Membran bestimmt. Beim in dieser Arbeit eingesetzten Verarbeitungsverfahren für die Herstellung der Druckdose übt die mechanische Spannung in der offenen Membran eine spezielle Auswirkung auf die Form der Membran aus. Eine Zugspannung in der Membran führt zu einer konkaven Membran, während eine konvexe Form der Membran durch eine Druckspannung in der Membran erzeugt wird. Für die Verschlusschicht der SiGe- und Ge-Druckdose wurden sowohl CVD-Materialien als auch

PECVD-Materialien entwickelt, während für die Verschlussschicht der a-Si-Druckdose nur ein PECVD-Material ausgesucht wurde.

Durchkontaktierungen aus Poly-SiGe oder Poly-Ge wurden auf der unterliegenden Metall-Ebene hergestellt. Die Widerstände der Durchkontaktierungen wurden gemessen. Ein Strom von 6mA wurde durch eine SiGe- oder Ge-Durchkontaktierung fließen gelassen, die einen quadratischen Querschnitt mit einer Kantenlänge von 1,2µm und eine Höhe von 900nm hat. Die Vorteile der Si-Ge- und Ge-Durchkontaktierung sind der große erlaubte Strom und die vereinfachte Integration mit der unterliegenden CMOS-Schaltung.

## **7 Herstellung der Druckdose mit Oberflächen-Mikromechanik-Verfahren**

Wie in Kapitel 4 beschrieben, wurden SiGe, Ge und a-Si für die Post-CMOS-Integration, die auf dem Einsatz der neuartigen Materialien der Druckdosen-Membran basiert, ausgesucht. In diesem Kapitel wird die Herstellung und Charakterisierung der Druckdose mit SiGe- und Ge-Membran als das erste Thema diskutiert. Anschließend werden die Herstellung und Charakterisierung der a-Si Druckdose diskutiert. Zum Ende wird ein zusammenfassender Vergleich der verschiedenen Konzepte durchgeführt.

### **7.1 Herstellung der Druckdosen mit SiGe- und Ge-Membran**

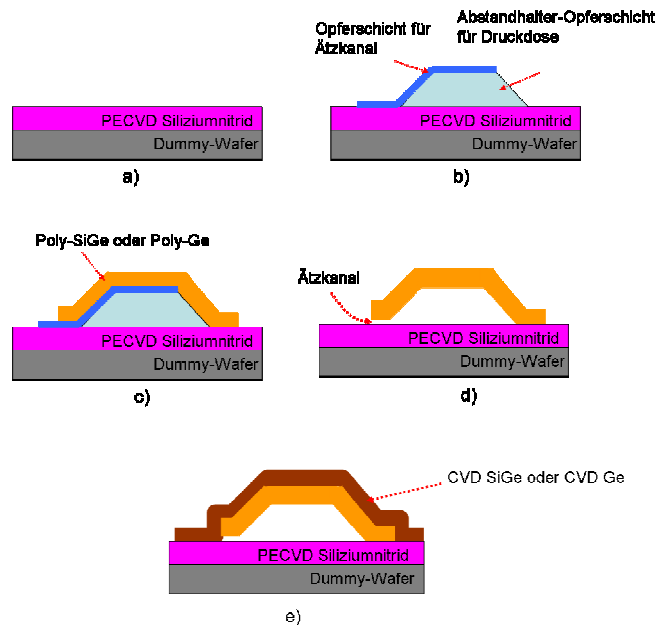
Eine kapazitive Druckdosenstruktur mit einer Membran aus SiGe-A, SiGe-B und Ge-A wurde mit einem modifizierten Druckdosenprozess hergestellt, der aktuell am Fraunhofer IMS läuft. Mit dieser Struktur konnten die Dichtigkeit und die Druckempfindlichkeit der Druckdose mit den neuen Materialien charakterisiert werden. Folglich wurde die Ausführbarkeit der Post-CMOS Integration der Druckdose mit den neuartigen Membranmaterialien, nämlich SiGe-A, SiGe-B und Ge-A verifiziert.

#### **7.1.1 Der eingesetzte oberflächenmikromechanische kapazitive-Druckdosen-Prozess**

Ein am Fraunhofer IMS laufender Prozess für die Produktion kreisförmiger kapazitiver Druckdosen wurde variiert und zur Herstellung der Druckdose mit neuartigen Materialien verwendet. Es handelt sich bei diesem Prozess um einen oberflächenmikromechanischen Prozess, welcher  $\text{SiO}_2$  als Opferschicht verwendet. Die Herstellung der Druckdose erfolgt mit einer Poly-Silizium-Membran. Die hohe Temperatur für die Kristallisation des Poly-Siliziums macht es erforderlich, dass die Herstellung der Druckdose vor der Metallisation ausgeführt werden muss. Dieser Prozess gehört zu Kategorie 2 in Abschnitt 2.2.

Die CMOS-kompatible Depositionstemperatur der Poly-SiGe und -Ge-Materialien ermöglicht die Herstellung der Druckdosen nach dem kompletten CMOS-Prozess inklusive der Metallisation. Teststrukturen der kapazitiven Druckdose wurden auf Dummy-Wafern hergestellt. Zur Simulation der Passivierung der CMOS-Schaltung wurde siliziumreiches Siliziumnitrid vor der Herstellung der Druckdose auf dem Wafer mit dem PECVD-Verfahren abgeschieden. Die  $\text{SiO}_2$ -Opferschicht ist aus USG und nicht aus PSG (*phosphosilicate glass*) wie beim laufenden Poly-Silizium-Druckdosen-Prozess. Obwohl die Opferschicht der im Rahmen dieser Arbeit hergestellten Testdruckdose mit Flusssäure weg-geätzt wurde, war das geplante Verfahren für die Entfernung der Opferschicht beim echten

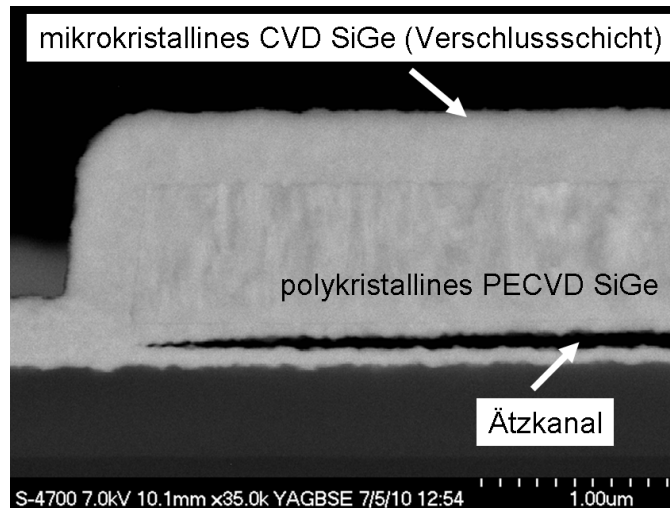
Integrationsprozess gasförmiges HF-Ätzen, da Flusssäure die metallischen Leiterbahnen in der CMOS Schaltung beschädigen könnte. Der Phosphor in PSG kann die Bildung nicht flüchtiger Reste beim gasförmigen HF- Ätzen hervorrufen. Daher wurde im modifizierten Prozess USG anstatt PSG für die SiO<sub>2</sub>-Opferschicht eingesetzt.



**Abbildung 7.1:** Grober Prozessablauf für die Herstellung der Teststruktur der kapazitiven Druckdose mit SiGe oder Ge Membran auf einem Dummy-Wafer. a) Dummy-Wafer mit siliziumreichem Nitrid darauf; b) Opferschicht aus USG wird abgeschieden und strukturiert; c) Poly-SiGe oder -Ge Schicht wird abgeschieden und strukturiert; d) Opferschicht wird weg geätzt; e) Druckdose wird im Vakuum mit durch CVD abgeschiedenes SiGe oder Ge verschlossen.

Abbildung 7.1 zeigt grob den Prozessablauf, der für die Herstellung der Teststruktur der kapazitiven Druckdose auf einem Dummy-Wafer verwendet wurde. Dummy-Wafer sind 8-Zoll Silizium-Wafer, auf die siliziumreiches Nitrid abgeschieden wurde. Die USG-Abstandhalter-Opferschicht für den Innenraum der Druckdose wird auf dem Dummy-Wafer mit dem PECVD-Verfahren abgeschieden, und durch nasschemisches Ätzen strukturiert. Danach wird die strukturierte Opferschicht für die Ätzkanäle auf dem Wafer ähnlich aufgebracht. Anschließend wird das Material für die offene Membran, nämlich Poly-SiGe oder -Ge, über den strukturierten Opferschichten mit dem PECVD-Verfahren abgeschieden. Zur Strukturierung des Poly-SiGe oder Poly-Ge wird das RIE-Ätzverfahren eingesetzt. Nach dem RIE-Ätzen wird die USG- Opferschicht durch nasschemisches HF-Ätzen entfernt, und somit werden frei schwebende Membranen produziert. Zum Verschließen der Druckdose wird am Ende SiGe oder Ge mit einem CVD Prozess auf dem Wafer abgeschieden. Abbildung 7.2 stellt eine REM Aufnahme eines verschlossenen Ätzkanals einer im Rahmen dieser Arbeit hergestellten SiGe-

Druckdose dar, wobei die CVD SiGe Verschlusschicht, die offene Poly-SiGe Membran und der Ätzkanal deutlich zu erkennen sind.



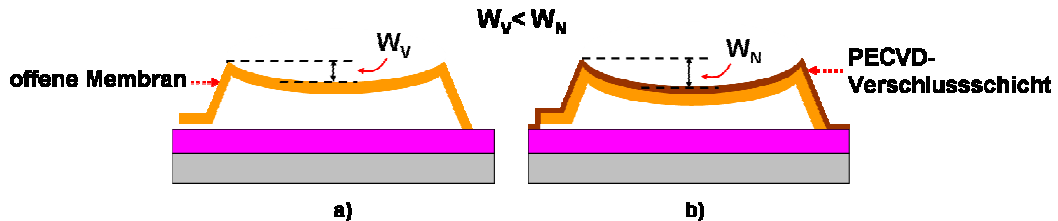
**Abbildung 7.2:** REM Aufnahme eines verschlossenen Ätzkanals einer im Rahmen dieser Arbeit hergestellten SiGe-Druckdose.

Beim RIE-Ätzen für die Strukturierung der offenen Membran wurde  $\text{BCl}_3/\text{Cl}_2/\text{N}_2$  Plasma verwendet. 50% Flusssäure mit Benetzungsmittel wurde zum Entfernen der Opferschichten eingesetzt. Da die Ätzrate im Ätzkanal bestimmt, wie schnell die Entfernung der Opferschicht gelingen kann, wurden zwei Materialien für die Opferschicht der Ätzkanäle getestet, und zwar das SILOX (Siloxane) und das TEOS (Tetraethylorthosilicat) –USG, welche mit einem PECVD-Prozess abgeschieden werden. Es wurde beobachtet, dass die Ätzrate von TEOS USG in flüssiger Flusssäure circa 1,6mal so groß wie die Ätzrate von SILOX USG ist. Daher ist TEOS USG besser geeignet für die Opferschicht des Ätzkanals, wenn flüssiges HF-Ätzen für die Entfernung der Opferschicht eingesetzt wird.

### 7.1.2 Die von der Verschlusschicht verursachte Durchbiegungsveränderung

In dieser Arbeit wurde gefordert, dass sich die Membran der Druckdose nach dem Verschluss leicht nach unten biegt, da eine Membranausbeulung nach oben die Kapazität der Druckdose reduzieren kann. Die Durchbiegung der Membran vor dem Verschluss der Druckdose kann durch die mechanische Spannung der Membran justiert werden. Allerdings kann die Verschlusschicht auch die Form der letztendlichen Membran beeinflussen. Obwohl die Verschlusschicht auf der Membran nach dem Verschluss weggeätzt werden kann (Ätzkanal wird von der Seite verschlossen.), macht ein solcher Schritt den Prozess komplizierter. Der Einfluss der Verschlusschicht auf die endgültige Form der Membran wurde untersucht.

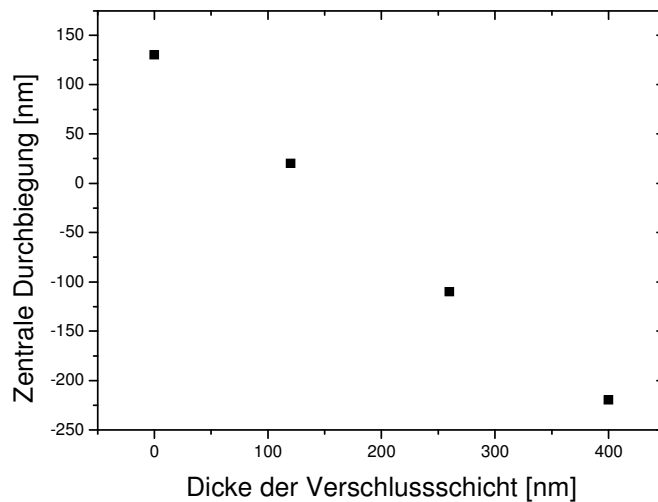
In dieser Arbeit wurde die Durchbiegung der offenen Membran durch die mechanische Spannung der Membran eingestellt, so dass sich die offene Membran nach der Entfernung der Opferschicht nach unten biegen konnte. Sowohl mittels PECVD als auch mittels CVD abgeschiedene Verschlusschichten wurden angesichts ihrer Auswirkung auf die Form der endgültigen Membran untersucht.



**Abbildung 7.3:** Schematische Darstellung der Auswirkung der Verschlusschicht mit einer größeren Zugspannung als die der offenen Membran. a) Offene Membran nach Entfernung der Opferschicht, wobei  $W_V$  die zentrale Durchbiegung der Membran ist; b) Nach Verschluss der Druckdose mit einer PECVD Verschlusschicht, wobei  $W_N$  die zentrale Durchbiegung ist. Hier wird angenommen, dass der Innendruck und der äußere Druck der Druckdose gleich groß sind.

Um die Auswirkung der mittels PECVD abgeschiedenen Verschlusschicht zu untersuchen, wurde die offene Membran aus Ge-A hergestellt. Wegen der Zugspannung von Ge-A verbiegt sich die Membran nach Entfernung der Opferschicht leicht nach unten. Eine Schicht aus SGe-C, die eine Zugspannung von 173MPa besitzt, wurde als Verschlusschicht auf der offenen Membran abgeschieden. Da die Zugspannung von Ge-A auf Siliziumnitrid (circa 108MPa) kleiner als die dieser Verschlusschicht ist, soll diese die nach unten gerichtete Durchbiegung der Membran weiter verstärken. Abbildung 7.3 stellt schematisch dar, wie eine mittels PECVD abgeschiedene Verschlusschicht die Durchbiegung der Membran verstärken soll. Die hier verwendete Germanium-Verschlusschicht wurde mit NGGFR=1,5 bei einer elektrischen Leistung von 95W abgeschieden, wobei die Gaszusammensetzung UGV entsprach.

Der Durchmesser der Druckdose beträgt 99 $\mu$ m, und der Nennwert der Dicke der USG Opferschicht (inklusive Ätzkanal-Opferschicht) ist 790nm. Die zentrale Abweichung (Durchbiegung oder Ausbeulung) der Membran wurde mit einem optischen Profilometer der Firma Fries Research & Technology GmbH gemessen. Nach der Entfernung der Opferschicht gibt es eine zentrale nach unten gerichtete Durchbiegung der Membran von circa 120nm. Nach dem Verschließen der Druckdose soll die Durchbiegung wegen der größeren Zugspannung der Verschlusschicht und der äußeren Druckbelastung der Atmosphäre an der Membran weiter nach unten verstärkt werden. Allerdings wurde nach dem Verschluss eine Ausbeulung nach oben an der Membran beobachtet. Diese Ausbeulung beträgt am Zentrum der Membran circa 220nm.



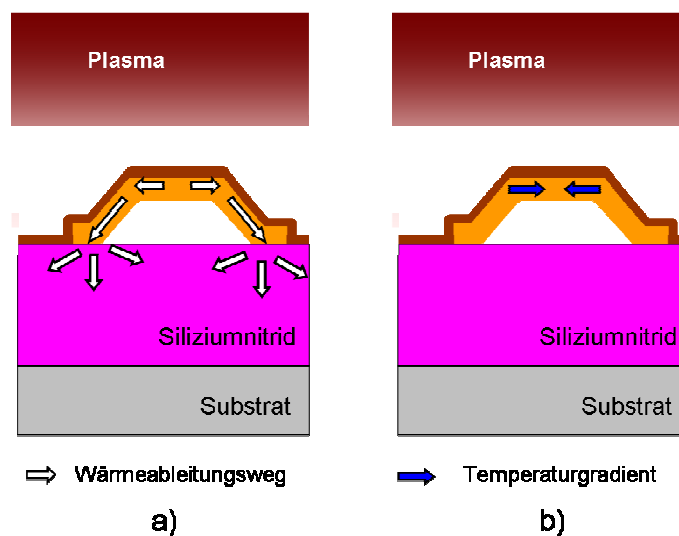
**Abbildung 7.4:** Die zentrale Durchbiegung einer Druckdose mit Ge-Membran in Abhängigkeit zur Dicke der Verschlusschicht.

Die Ausbeulung könnte von der Ausgasung aus den PECVD Schichten oder der mechanischen Spannung der Verschlusschicht verursacht werden. Um die letzte mögliche Ursache, nämlich die mechanische Spannung in der Verschlusschicht nachzuweisen, wurde die Verschlusschicht schrittweise wieder weg geätzt. Nach der Entfernung von 140nm der Verschlusschicht reduzierte sich die Ausbeulung auf 110nm. Als wieder 140nm der Verschlusschicht weggeätzt wurden, gab es am Zentrum der Membran eine nach unten gerichtete Durchbiegung von circa 20nm. Nachdem die Verschlusschicht komplett entfernt wurde, ging die Durchbiegung wieder zurück zum ursprünglichen Wert vor der Abscheidung der Verschlusschicht. In Abbildung 7.4 ist die zentrale Durchbiegung der Membran gegen die Dicke der Verschlusschicht aufgetragen, wobei die negative Durchbiegung eine Ausbeulung der Membran bedeutet. Die Durchbiegung der Membran nimmt linear mit der zunehmenden Verschlusschichtdicke ab. Dieses Ergebnis zeigt einerseits, dass die 400nm dicke PECVD-Verschlusschicht die Ätzkanäle nicht verschließen konnte, andererseits, dass die Ausbeulung der Membran durch die mechanische Spannung der Verschlusschicht und nicht von einer Ausgasung hervorgerufen wird.

Dieser Versuch deutet an, dass die Verschlusschicht lokal auf der Membran nicht wie erwartet eine größere Zugspannung als die darunterliegende Ge-A-Membran besitzt. Temperaturgradienten in der Membran während der PECVD Abscheidung können zu lokalen Druckspannungen der Verschlusschicht auf der Membran führen. Abbildung 7.5 zeigt, wie die Temperaturgradienten in der Membran während der Abscheidung der Verschlusschicht zustande kommen. Viele energetische Teilchen sind im Plasma während der PECVD-Abscheidung vorhanden. Die



Wärmeenergie dieser Teilchen kann zur Waferoberfläche übertragen werden. Darüber hinaus können auch chemische Reaktionen an der Waferoberfläche Wärme erzeugen. Diese Wärme erhöht die Temperatur der Waferoberfläche, d.h., die Oberflächentemperatur des Wafers ist während der PECVD-Abscheidung höher als die des Substrates. Da unter der Membran ein Hohlraum mit Vakuum existiert, muss die Wärme entlang der Membran zum Substrat abgeleitet werden (vgl. Abbildung 7.5 a)). Dies kann zu Temperaturgradienten in der Membran führen (vgl. Abbildung 7.5 b)). Die Temperatur im Zentrum der Membran ist höher als die des äußeren Teils. Dies führt dazu, dass das Zentrum der Membran sich während der Abscheidung der Verschlusschicht stärker ausdehnt als der äußere Teil. Wenn der Wafer nach der Abscheidung der Verschlusschicht wieder auf Raumtemperatur gebracht wird, kontrahiert sich das Zentrum der Membran stärker als der äußere Teil. Daher kommt die stärkste Druckspannung in der Verschlusschicht im Zentrum der Membran zustande. Da die Temperatur der offenen Membran während der Abscheidung der Verschlusschicht höher als anderen Teile der Waferoberfläche ist, kann die Verschlusschicht auf der Membran eine Druckspannung besitzen, während die Verschlusschicht an den anderen Bereichen eine Zugspannung hat. Die Ausbeulung der Druckdose nach Verschluss mit durch PECVD abgeschiedenem Material wird dadurch hervorgerufen, dass lokale Druckspannungen oder kleinere Zugspannungen in der Verschlusschicht auf der Druckdosenmembran vorhanden sind. Da diese lokalen Veränderungen der mechanischen Spannung vom Plasma verursacht werden, könnten alle mittels PECVD abgeschiedenen Materialien nicht geeignet zur Anwendung als Verschlusschicht sein. Deswegen wurde mittels CVD abgeschiedenes Material für die im Rahmen dieser Arbeit zu entwickelnde Druckdose für den Verschluss gewählt.



**Abbildung 7.5:** Schematische Darstellung des Wärmeableitungsweges a) und des Temperaturgradienten b) in der Membran während der Abscheidung der PECVD-Verschlusschicht.

Wie in Abschnitt 6.2.1.2 beschrieben wird, werden zwei Materialien für den Verschluss der Druckdose in dieser Arbeit eingesetzt, nämlich CVD-SiGe-A und CVD-Ge-A. Die lokale mechanische Spannung der mittels CVD abgeschiedenen Verschlussschicht auf der Membran ist auch anders als die der CVD-Verschlussschicht an anderen Bereichen der Waferoberfläche, da die chemische Reaktionen an der Waferoberfläche auch Wärme abgeben. Jedoch ist die lokale Temperaturänderung an der Oberfläche der Membran wegen der Abwesenheit des Plasmas kleiner als beim PECVD-Prozess. Wenn eine offene Membran vor dem Verschluss der Druckdose aufgrund einer Zugspannung in der Membran schon eine ausreichende nach unten gerichtete Durchbiegung besitzt, kann erreicht werden, dass die Membran nach dem Verschluss der Druckdose eine nach unten gerichtete Durchbiegung beibehält. Ein anderer Vorteil der mittels CVD abgeschiedenen Materialien für den Verschluss der Druckdose ist, dass CVD die Ätzkanäle winkelkonform und folglich effektiv verschließen kann.

**Tabelle 7.1:** Durchbiegung der Membran der Druckdose vor und nach dem Verschluss der Druckdose.

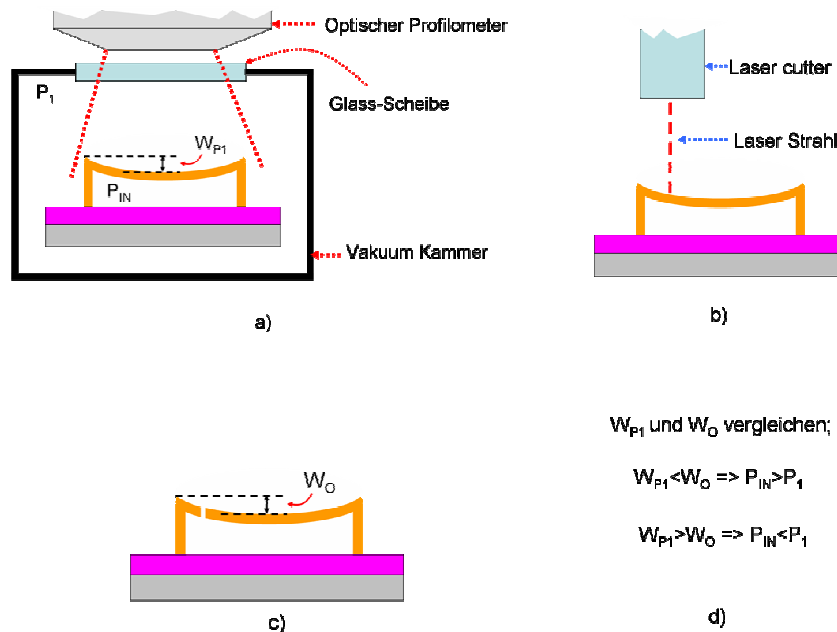
Material der offenen Membran (Dicke)	Material der Verschlussschicht (Dicke)	Zentrale Durchbiegung nach Entfernung der Opferschicht [nm]	Zentrale Durchbiegung nach Tempern vor dem Verschluss der Druckdose [nm]	Zentrale Durchbiegung nach Verschluss der Druckdose [nm] (unter 1atm)
SiGe-A (950nm)	CVD-SiGe-A (460nm)	131	159	150
SiGe-B (760nm)	CVD-SiGe-A (470nm)	145	189	219
Ge-A (870nm)	CVD-Ge-A (400nm)	134	158	41

In Tabelle 7.1 wird die Durchbiegung der Membran der Druckdose, deren offenen Membran entsprechend aus SiGe-A, SiGe-B und Ge-A hergestellt wurden, zusammengefasst. Alle Durchbiegungen sind nach unten gerichtet. Die Durchbiegung der Membran direkt nach der Entfernung der Opferschicht wird von der Zugspannung der Membran verursacht. Vor dem Verschluss der Druckdose wird der Wafer getempert, um späteres Ausgasen aus den mittels PECVD abgeschiedenen Schichten zu vermeiden. Nach dem Tempern nimmt die Durchbiegung zu, da

die Zugspannung in der Membran vergrößert wird. Die Durchbiegung der endgültigen Membran nach dem Verschluss der Druckdose wird von der mechanischen Spannung der offenen Membran und der Verschlussschicht zusammen mit der Belastung durch die Atmosphäre außerhalb der Druckdose verursacht.

### 7.1.3 Innendruck-Charakterisierung der verschlossenen Druckdose

Da die Druckdose-Membran und das Siliziumnitrid auf der Waferoberfläche mit PECVD-Verfahren abgeschieden werden, sind viele Fremdatome, vor allem Wasserstoff-Atome, in diesen Schichten eingebunden. Diese Fremdatome können bei einem Hochtemperatur-Prozess, oder nach einer langen Zeit, aus den Schichten diffundieren, was als Ausgasung bezeichnet wird. Die Ausgasung kann den Innendruck der Druckdose erhöhen, und damit die Langzeitstabilität der Druckdose reduzieren. Der Einfluss der Ausgasung auf den Innendruck der Druckdose kann vermieden werden, entweder durch einen Tempern-Schritt vor dem Verschluss der Druckdose, oder durch Einsatz von einer Diffusionsbarriere die den Innenraum der Druckdose von den PECVD Schichten trennt. Die Wirksamkeit der ersten Methode wurde in dieser Arbeit durch Versuche verifiziert.



**Abbildung 7.6:** Eine Methode, den Innendruck der Druckdose abzuschätzen. a) Die Durchbiegung der Druckdose in Vakuum mit dem Druck  $P_1$  messen; b) Ein Loch in der Membran der Druckdose mit *lascutter* schneiden; c) Die Durchbiegung der Membran noch mal messen; d)  $W_{P1}$  und  $W_O$  vergleichen, und den Innendruck der Druckdose abschätzen.

Für die Versuche durchliefen einige Wafer nach der Entfernung der Opferschicht einen EKC-Reinigungs- und, anschließend einen Tempern-Schritt vor dem Verschluss der Druckdose, zum Vergleich mit den Wafern, die die beiden Schritte

nicht durchgelaufen hatten. Das Tempern für SiGe-A und SiGe-B Druckdose wird bei 430°C für 50min und danach bei 450°C für 40min in Vakuum durchgeführt, und die Ge-A Druckdosen werden bei 380°C für 40min und anschließend bei 400°C für 30min in Vakuum getempert. Durch Tempern können Fremdatome aus den PECVD Schichten vor dem Verschluss der Druckdose ausgetrieben werden, so dass sie kein Einfluss mehr auf den Innendruck der Druckdose haben können.

Um den Effekt der Reinigungs- und Temper-Schritte zu überprüfen, werden zwei Wafer mit SiGe-A Druckdose-Membran verglichen. Ein Wafer lief die beiden Schritte durch, und der andere nicht. Der Innendruck der abgeschlossenen Druckdose wird mit einer in dieser Arbeit entworfenen Abschätzungsmethode abgeschätzt. Diese soll als nächste erklärt werden.

**Tabelle 7.2:** Vergleich der Durchbiegung der Druckdosen mit und ohne Reinigung und Tempern vor dem Verschluss der Membran, um den Innendruck der Druckdose und folglich die Wirksamkeit von der Reinigung und dem Tempern zu überprüfen.

Druck beim Messen Druckdose		1atm (nm)	169mbar (nm)	2,5µbar (nm)	Mit Loch in der Membran (nm)
Mit Reinigung und Tempern	Druckdose A	144	-55,3	<b>-87</b>	-72
	Druckdose B	129	-43,8	<b>-75</b>	-55
	Druckdose C	126	-48,2	<b>-81</b>	-53
Ohne Reinigung und Tempern	Druckdose A	4,2	<b>-164</b>	-188	-146
	Druckdose B	-16,6	<b>-172</b>	-186	-146
	Druckdose C	-20,9	<b>-174</b>	-200	-144

In Abbildung 7.6 wird diese Methode schematisch dargestellt. Die Durchbiegung einer Druckdose  $W_{PI}$  wird zuerst in einer Vakuumkammer mit Druck  $P_1$  mit einem optischen Profilometer gemessen. Danach wird am äußeren Teil der Membran ein kleines Loch mit einem Lasercutter erzeugt. Mit Hilfe dieses Lochs werden der Innen- und Außendruck der Druckdose gleich. Anschließend wird die Durchbiegung der Membran  $W_O$  noch mal mit dem Profilometer gemessen.  $W_O$  und  $W_{PI}$  werden zum Abschätzen des Innendrucks der Druckdose miteinander verglichen.  $W_O$  zeigt den Zustand der Membran an, wann der Innen- und Außen-

druck der Druckdose gleich sind.  $W_O > W_{PI}$  bedeutet, dass beim Messen der Druckdose in P1 der Innendruck größer als der Außendruck der Druckdose, nämlich P1, ist. Wenn  $W_O < W_{PI}$ , dann wird die umgekehrte Schlussfolgerung gezogen. Wenn ausreichend viele Druckwerte zu der Charakterisierung eingesetzt werden, kann die Abschätzung ziemlich genau werden.

Druckdosen mit und ohne Reinigung sowie Tempern werden mit der oben erläuterten Methode verglichen. In Tabelle 7.2 werden die Durchbiegungen der Druckdosen, die bei 1atm, 169mbar, 2,5µbar, und nach der Erzeugung des Lochs in der Membran gemessen wurden, zusammengefasst. Die Durchbiegungen wurden mit einem optischen Profilometer der Firma Fogale Nanotech aufgenommen. Mit der Abschätzungsmethode kann eine Schlussfolgerung gezogen werden, dass der Innendruck der Druckdosen mit Reinigung und Tempern kleiner als 169mbar und größer als 2,5µbar ist, während der Innendruck derjenigen Druckdosen ohne Reinigung und Tempern größer als 169mbar ist. Dieses Ergebnis beweist, dass die Reinigungs- und Tempern-Schritte notwendig sind, um die Ausgasung der PECVD Schichten während der Abscheidung der Verschlussschicht zu unterdrücken, und ein gutes Vakuum innerhalb der Druckdose zu schaffen.

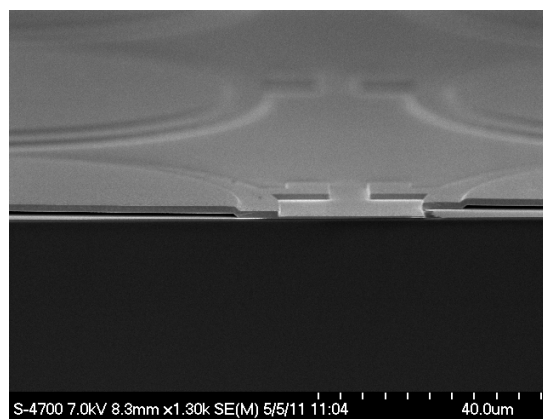
**Tabelle 7.3:** Vergleich der zentralen Durchbiegungen von drei Druckdosen, die an zwei Messungen bei 1atm aufgenommen wurden. Zwischen den beiden Messungen gab es ein Intervall von sieben Monaten.

Gemessene Druckdosen	Zentrale Durchbiegung an 1. Messung [nm]	Zentrale Durchbiegung an 2. Messung [nm]
A (SiGe Membran)	245	242
B (SiGe Membran)	109	112
C (Ge Membran)	36	40

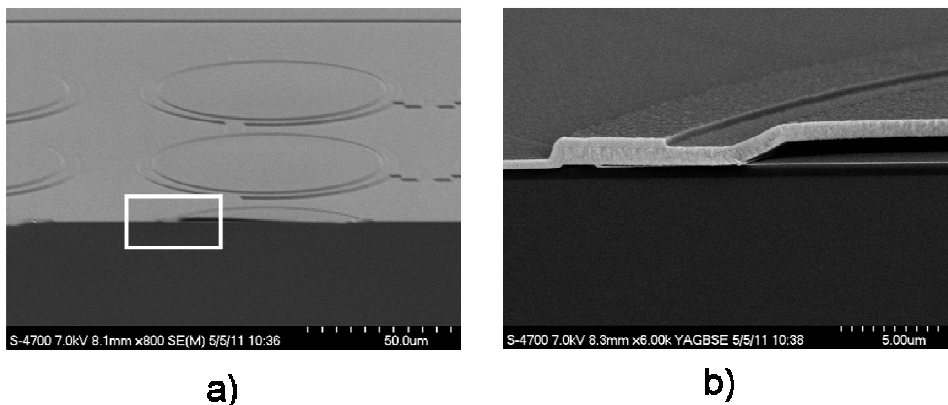
Die Reinigungs- und Temper-Schritt sind auch langzeiteffektiv. Die Durchbiegung der mit den beiden Schritten behandelten Druckdosen bleibt konstant nach einer Lagerung von sieben Monaten in der Atmosphäre bei Raumtemperatur. Tabelle 7.3 zeigt den Vergleich der zentralen Durchbiegungen von drei Druckdosen, die mit zwei Messungen bei 1atm aufgenommen wurden. Zwischen den beiden Messungen gab es ein Intervall von sieben Monaten. Kein Unterschied ist zwischen den Ergebnissen der beiden Messungen zu erkennen.

#### 7.1.4 Charakterisierung der Druckabhängigkeit der Druckdosen mit SiGe- und Ge-Membran

Um die Herstellbarkeit von SiGe- und Ge- Druckdose sowie die mechanischen Eigenschaften der SiGe- und Ge-Membran zu überprüfen, wurde die Teststruktur, die in Abschnitt 7.1.1 beschrieben worden ist, hergestellt. Die Durchmesser der Druckdosen sind  $99\mu\text{m}$  und  $95\mu\text{m}$ . Die Nominaldicke der Opferschicht zwischen der Membran und dem Boden des Innenraums der Druckdose betrug  $790\text{nm}$ . Bei einigen Druckdosen mit offener Membran aus SiGe-A oder SiGe-B wurde die Dicke der Verschlusschicht auf der Membran nach dem Verschluss der Druckdose von ihrem ursprünglichen Wert auf  $40\text{nm}$  mit dem RIE Verfahren gemindert.



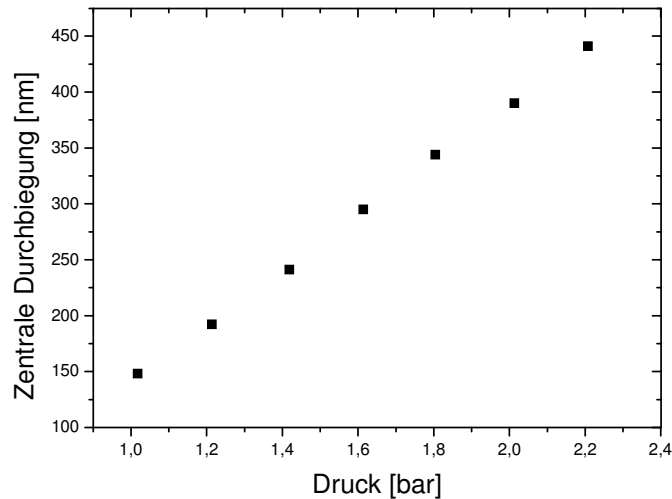
**Abbildung 7.7:** REM Aufnahme verschlossener Ge-A Druckdosen, deren Membran aus  $870\text{nm}$  Ge-A und  $400\text{nm}$  CVD-Ge-A besteht.



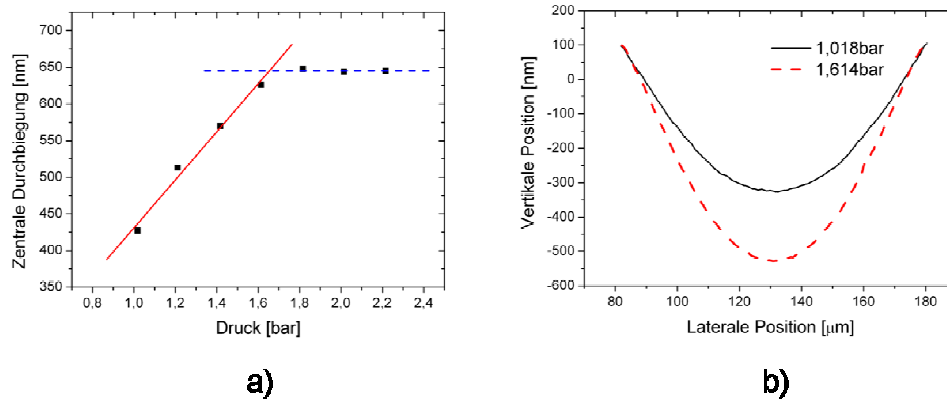
**Abbildung 7.8:** a) REM Aufnahme verschlossener SiGe-B Druckdosen, bei denen die Verschlusschicht auf der Membran nach dem Verschluss der Druckdose wieder auf circa  $40\text{nm}$  mit dem RIE Verfahren verdünnt wurde; b) Vergrößerung des in a) mit weißem Rahmen umgebenen Bereichs.

Abbildung 7.7 zeigt eine REM-Aufnahme verschlossener Druckdosen, bei denen die Ge-A Membran mit CVD-Ge-A Schicht verschlossen wurde. In Abbildung 7.8 sind zwei REM-Aufnahmen der mit CVD-SiGe-A verschlossenen SiGe-B Druck-

dosen dargestellt, bei denen die Dicke der Verschlusschicht auf der Membran nach dem Verschluss der Druckdose auf circa 40nm reduziert wurde. Abbildung 7.8 b) zeigt die von dieser Reduzierung erzeugte Stufe am Rand der Membran.



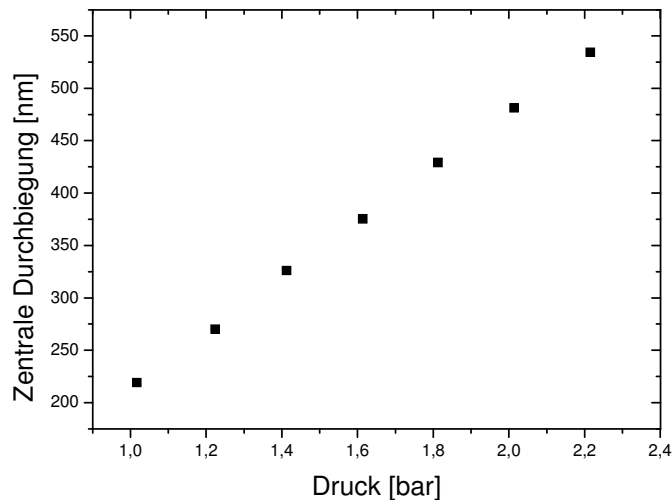
**Abbildung 7.9:** Zentrale Durchbiegung der Membran einer Druckdose mit einem Durchmesser von 99µm in Abhängigkeit von der Druckbelastung. Die Membran besteht aus 950nm SiGe-A und 460nm CVD-SiGe-A.



**Abbildung 7.10:** a) Zentrale Durchbiegung der Membran einer Druckdose mit einem Durchmesser von 99µm in Abhängigkeit von der Druckbelastung; b) Profil der Membran durch den Mittelpunkt der Membran bei 1,018bar und 1,614bar, mit optischem Profilometer aufgenommen. Die Membran besteht aus 950nm SiGe-A und 40nm CVD-SiGe-A. Die Dicke der Verschlusschicht auf der Membran wurde nach dem Verschluss der Druckdose auf 40nm reduziert.

Die Druckempfindlichkeit der verschlossenen Druckdosen wurde mit einem optischen Profilometer charakterisiert. Dabei wurde die zentrale Durchbiegung der

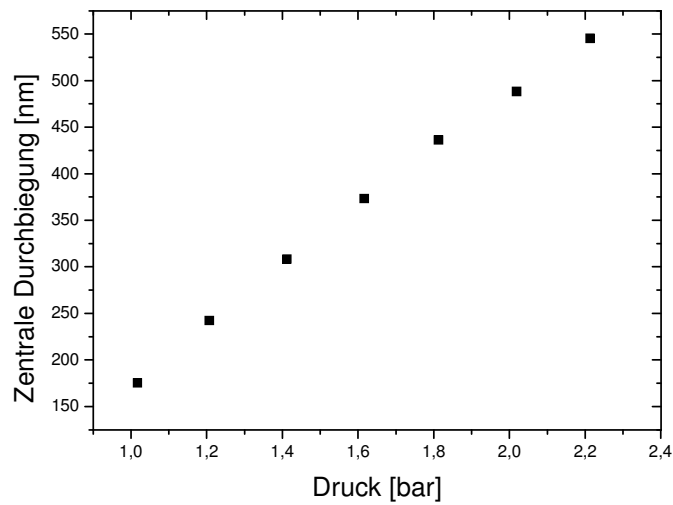
Membran der Druckdose bei verschiedenen Druckbelastungen gemessen. Abbildung 7.10 b) zeigt das Profil durch den Mittelpunkt der Membran einer Druckdose bei 1,018bar und 1,614bar, das vom optischen Profilometer aufgenommen worden ist. In Abbildung 7.9, Abbildung 7.10 a), Abbildung 7.11, Abbildung 7.12 und Abbildung 7.13 sind die zentrale Durchbiegung der Membran entsprechend von fünf Druckdosen gegen Druckbelastung aufgetragen.



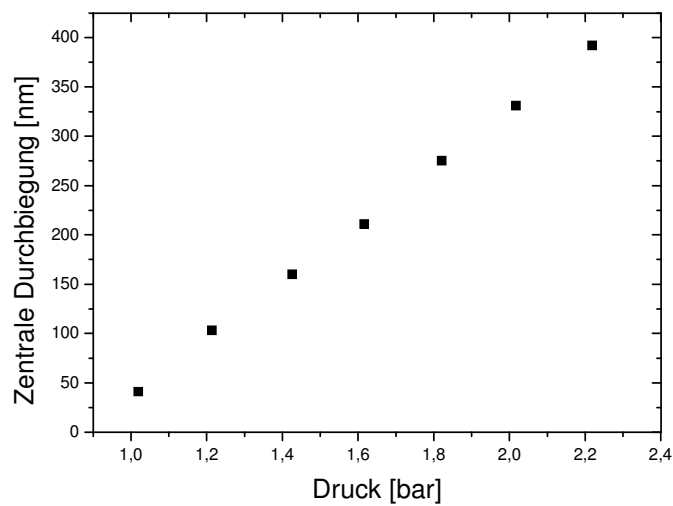
**Abbildung 7.11:** Zentrale Durchbiegung der Membran einer Druckdose mit einem Durchmesser von  $99\mu\text{m}$  in Abhängigkeit von der Druckbelastung. Die Membran besteht aus 760nm SiGe-B und 470nm CVD-SiGe-A.

Wie in diesen Abbildungen zu erkennen ist, nimmt die zentrale Durchbiegung der Membran mit zunehmender Druckbelastung linear zu. Gleichung 3.30 zeigt die lineare Relation zwischen Druckbelastung und der zentralen Durchbiegung einer am Rand befestigten, von Eigenspannung freien Membran. Obwohl die in dieser Arbeit hergestellte Druckdose die beiden Voraussetzungen von Gleichung 3.30 nicht erfüllt, d.h., die Membran der Druckdose nicht am Rand befestigt und nicht von Eigenspannung frei ist, ist die zentrale Durchbiegung der Membran trotzdem linear abhängig von der Druckbelastung.





**Abbildung 7.12:** Zentrale Durchbiegung der Membran einer Druckdose mit einem Durchmesser von  $99\mu\text{m}$  in Abhängigkeit von der Druckbelastung. Die Membran besteht aus 760nm SiGe-B und 40nm CVD-SiGe-A. Die Verschlusschicht auf der Membran wurde nach dem Verschluss der Druckdose von 460nm auf 40nm durch RIE reduziert.



**Abbildung 7.13:** Zentrale Durchbiegung der Membran einer Druckdose mit einem Durchmesser von  $99\mu\text{m}$  in Abhängigkeit von der Druckbelastung. Die Membran besteht aus 870nm Ge-A und 400nm CVD-Ge-A.

**Tabelle 7.4:** Druckempfindlichkeit der in Abbildung 7.9, Abbildung 7.10 a), Abbildung 7.11, Abbildung 7.12 und Abbildung 7.13 dargestellten Druckdose.

Material / Dicke der offenen Membran	Material / Dicke der Verschlusschicht	Druckempfindlichkeit $dW(0)/dp$
SiGe-A / 950nm	CVD-SiGe-A / 460nm	246nm/bar
SiGe-A / 950nm	CVD-SiGe-A / 40nm	334nm/bar
SiGe-B / 760nm	CVD-SiGe-A / 470nm	263nm/bar
SiGe-B / 760nm	CVD-SiGe-A / 40nm	312nm/bar
Ge-A / 870nm	CVD-Ge-A / 400nm	290nm/bar

Die Druckempfindlichkeit  $dW(0)/dp$  der in Abbildung 7.9, Abbildung 7.10 a), Abbildung 7.11, Abbildung 7.12 und Abbildung 7.13 dargestellten Druckdose wird in Tabelle 7.4 zusammengefasst. Nach der Abdünnung der Verschlusschicht nimmt die Druckempfindlichkeit zu. Die Variation der Druckempfindlichkeit nach Abdünnung der Verschlusschicht stammt aus der Abdünnung der Membran der Druckdose und der von RIE bedingten Modifikation der mechanischen Spannung der dünnen oberen Teil der Membran.

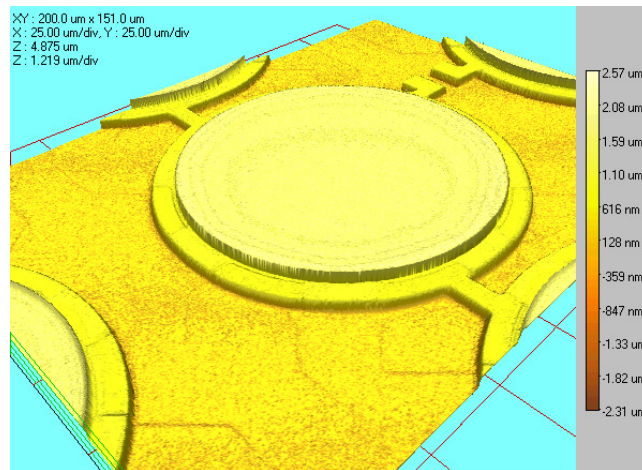
Die analytische oder numerische Beschreibung der Durchbiegung der Druckdose ist nicht Bestandteil dieser vorliegenden Arbeit. Bei der Druckdose, deren Verschlusschicht nicht gedünnt wurde, ist die mechanische Spannung der Verschlusschicht auf der Membran unklar. Obwohl bei der Druckdose mit gedünnter Verschlusschicht die Dicke der gedünnten Verschlusschicht vernachlässigbar klein ist, wird die mechanische Spannung des obersten Teils der ursprünglich offenen Membran durch das RIE-Verfahren verändert. Für die Beschreibung der Durchbiegung muss zuerst die mechanische Spannung in den Schichten charakterisiert werden, da die mechanische Spannung eine sehr wichtige Auswirkung auf die Durchbiegung der Membran ausübt. In den letzten Jahren tauchten viele Modelle für die Beschreibung der Durchbiegung einer kreisförmigen mehrlagigen Membran mit Berücksichtigung der mechanischen Spannung der verschiedenen Lagen auf [91] [92] [93].

## 7.2 Herstellung der Druckdosen mit a-Si-Membran

In diesem Abschnitt werden zuerst die Versuche zum Herstellen einer a-Si-Druckdose beschrieben. Danach werden die Probleme des a-Si-Konzeptes aufgrund experimenteller Ergebnisse diskutiert.

### 7.2.1 Herstellung der Druckdosen mit a-Si Membranen

Es wurde versucht, wie bei SiGe und Ge-Druckdose verschlossene Druckdosen mit a-Si-A Membran herzustellen. Allerdings konnte dies wegen der Undichtigkeit von a-Si-A an Stufenkanten gegen das Opferschicht-Ätzmittel, die Flusssäure (HF), nicht geschafft werden. Der Prozess lief nur bis Schritt d) (definiert in Abbildung 7.1), d.h. bis zur Entfernung der Opferschicht.



**Abbildung 7.14:** 3D Bild einer Topographie-Aufnahme mit optischem Profilometer an einer Druckdose mit einem Durchmesser von 99µm. Die Membran war aus a-Si-A und wurde noch nicht verschlossen.

In Abbildung 7.14 ist ein 3D-Bild einer Topographie-Aufnahme mit optischem Profilometer an einer Druckdose mit einem Durchmesser von 99µm dargestellt. Dabei war die Druckdosenmembran aus a-Si-A und wurde noch nicht verschlossen. Die Dicke der Membran betrug circa 590nm. Eine zentrale Durchbiegung von circa 180nm wurde an dieser Druckdose gemessen. Dieser Wafer wurde nicht weiter prozessiert, da viele Abplatzungen wegen Unterätzung auf dem Wafer beobachtet wurden und solch ein Wafer voller Partikel nicht mehr in Reinraum weiter prozessiert werden konnte.



**b)**



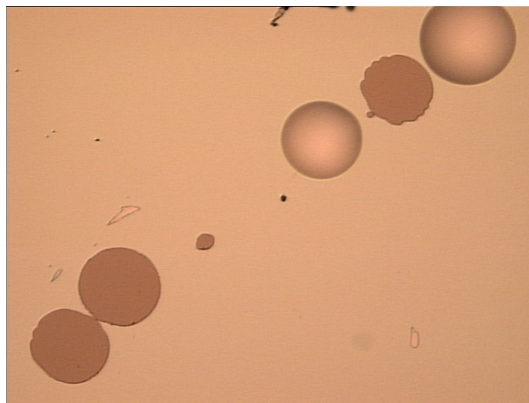
e c

7.15 b)). Wenn ausreichendes Oxid weggeätzt wurde, platzten die obere a-Si-A- und Nitrid-Schicht ab und führten zu zahlreichen Partikeln.

Abbildung 7.16 zeigt eine Mikroskop Aufnahme der Abplatzung der a-Si-A- und Siliziumnitrid-Schicht. Auch das gasförmige HF-Ätzverfahren wurde für die Entfernung der USG-Opferschicht ausprobiert. Dabei wurden ähnliche Ergebnisse wie die des flüssigen HF-Ätzverfahrens beobachtet. Die Tatsache, dass a-Si-A nicht an den Kanten dicht ist, führt dazu, dass a-Si-A nach Strukturierung nicht bei Kanten bleiben darf. Das kompliziert den Integrationsprozess.

Ein bor-dotiertes amorphes Silizium wurde dicht gegen flüssige HF gefunden. Es wird bei einer Substrat-Temperatur von circa 310°C abgeschieden. Dabei sind die Prozessgase  $\text{SiH}_4$  (500sccm), Argon (2000sccm) und  $\text{B}_2\text{H}_6$  (600sccm) und der Kammer-Druck beträgt 4Torr. Sowohl die 13,56MHz Signal-Quelle als auch die 345kHz Signal-Quelle werden bei der Abscheidung verwendet. Bei 13,56MHz ist der Nennwert der elektrischen Leistung 50W und der bei 345kHz beträgt 125W. Der Elektrodeabstand ist wie bei a-Si-A auch 300mil (7,62mm). Das bor-dortierte Material wird als b-a-Si-A bezeichnet.

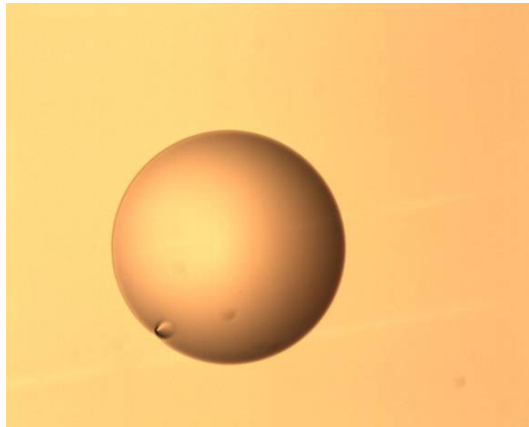
Das elektrische Signal mit 354KHz kann nicht nur Elektronen sondern auch Ionen im Plasma effektiv treiben, so dass die energetischen Ionen die Schicht während der Abscheidung „stampfen“ können. Das macht die abgeschiedene Schicht dichter. Außerdem führt die erhöhte Substrat-Temperatur auch zu einer dichten Schicht. Allerdings gibt es extrem hohe Druckspannung in b-a-Si-A, so dass eine Membran mit einem Durchmesser von 99 $\mu\text{m}$  und einer Dicke von 700nm schon eine zentrale Ausbeulung von 2,125 $\mu\text{m}$  bedingt.



**Abbildung 7.17:** Blasen und Abplatzung der a-Si-A Schicht auf Siliziumnitrid nach Tempern in  $\text{N}_2$  bei 450°C für 2 Min.

### 7.2.2 Probleme beim a-Si Konzept

Es wurde in dieser Arbeit beobachtet, dass amorphes Silizium metastabil ist. Zahlreiche Forschungsarbeiten an a-Si beschreiben die Blasen-Bildung von a-Si Schicht wegen der Ausgasung von H-Atomen aus der Schicht [94] [95]. Dasselbe Phänomen wurde auch in dieser Arbeit beobachtet. Wenn a-Si eine hohe Prozess-temperatur gesehen hatte, oder lang gelagert wurde, wurden viele Blasen wegen der Ausgasung gebildet.



**Abbildung 7.18:** Eine Blase der a-Si-A Schicht auf Siliziumnitrid nach Lagerung von 3 Monaten bei Raumtemperatur in Atmosphäre.

Abbildung 7.17 zeigt die Blasen und Abplatzung der a-Si-A Schicht auf Siliziumnitrid nach Tempern in  $N_2$  bei  $450^\circ C$  für 2 Min. Außer dem Hochtemperaturprozess kann eine lange Lagerung auch zur Ausgasung und folglich Blasen-Bildung führen. In Abbildung 7.18 ist eine Blase in a-Si-A Schicht auf Siliziumnitrid nach einer Lagerung von 3 Monaten bei Raumtemperatur in Atmosphäre dargestellt. Die in Abschnitt 6.1.3 dargestellte schlechte Langzeitstabilität deutet auch an, dass a-Si Material metastabil ist.

Die Integration der Druckdosen mit dem a-Si Konzept ist kompliziert. Die Tatsache, dass manche a-Si Materialien nicht dicht an scharfen Kanten bei Entfernung der Opferschicht sind, kompliziert den Integrationsprozess. Außerdem braucht eine Druckdose eine leitende Membran, und das Einbetten von leitender Schicht in a-Si macht den Integrationsprozess komplizierter. Es wurde beobachtet, dass Blasen in der auf AlCu(0,5%) abgeschiedenen a-Si Schicht gebildet wurden. Das kann daran liegen, dass AlCu die Kristallisation des unteren Teils der a-Si Schicht fördert hat, und der dadurch bedingte Spannungsgradient die Blasen verursacht haben konnte. Obwohl Verwendung des anderen leitenden Materials die Blasen vermeiden könnte, ist die Optimierung der mechanischen Spannung des Schichtenstapels jedenfalls komplizierter als beim Konzept mit Einzelschicht-Membran wie bei SiGe und Ge Druckdose. Angesichts der Komplexität des Integrationspro-

zesses und der Unstabilität des a-Si Materials ist der Konzept mit a-Si ungünstig im Vergleich zu dem SiGe- und Ge-Konzept.

### 7.3 Zusammenfassung und Vergleich

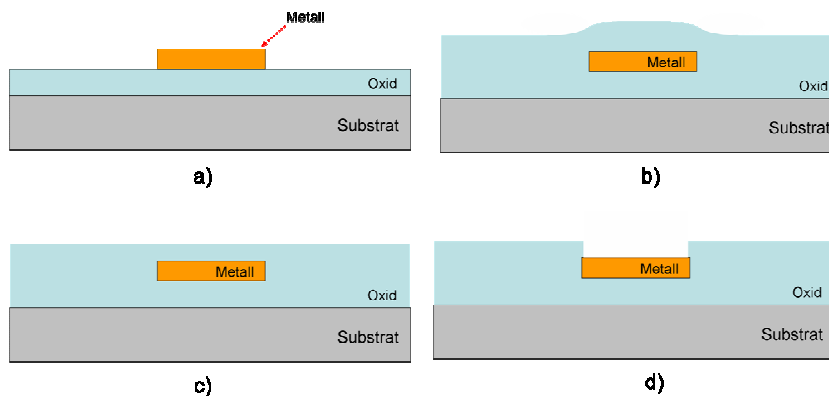
Die mechanisch charakterisierbare SiGe- und Ge- Druckdose wurden erfolgreich hergestellt. Dadurch wurde die gute Ausführbarkeit des auf SiGe- und Ge-Druckdose-Membran basierenden Integrationskonzeptes bewiesen. Es wurde gezeigt, dass die PECVD Materialien nicht geeignet für das Verschließen der Druckdose sind. Es wird vermutet, während der Abscheidung eines PECVD-Materials auf der offenen Membran Temperatur-Gradienten in der Membran gebildet werden könnten, was zu den lokalen Spannungsvariationen der abgeschiedenen PECVD-Verschlussschicht und folglich der Ausbeulung der endgültigen Membran führen könnte. CVD-Verschlussschichten wurden für die Herstellung der erfolgreichen SiGe- und Ge-Druckdose eingesetzt. Es wurde bewiesen, dass ein Reinigungs- und ein Temper-Schritt vor dem Verschließen der Druckdose für die Unterdrückung der Ausgasung und die Gewährleistung eines guten Innenvakuums effektiv sind. Eine Abschätzungsmethode für das Abschätzen des Innendrucks der Druckdose wurde entwickelt und eingesetzt. Die in dieser Arbeit hergestellten Druckdosen haben eine gute Langzeitstabilität gezeigt.

Eine offene Membran der a-Si Druckdose wurde hergestellt. Allerdings wurde das Verschließen der Druckdose nicht durchgeführt. Es wurde beobachtet, dass die a-Si Schicht an der Stufen-Kante gegen das Opferschicht-Ätzmittel nicht dicht ist. Obwohl das Problem durch Entwicklung gelöst werden kann, ist der Entwicklungsaufwand für das a-Si Konzept zu hoch, wenn auch andere Themen betrachtet werden. Da eine a-Si Schicht nicht gut leitend ist, muss eine leitende Schicht in a-Si eingebettet werden. Zudem wurde beobachtet, dass das a-Si Material metastabil ist, ausgast, und seine Langzeitstabilität schlecht ist. Außerdem kann a-Si nicht wie bei Poly-SiGe oder Poly-Ge auf Metall abgeschieden werden, um Durchkontaktierungen herzustellen. Im Vergleich mit dem SiGe- und Ge-Konzept besitzt das a-Si Konzept keine Vorteile, und deswegen wurde es nicht weiter verfolgt.

## 8 Versuche für Druckdose mit Plasma-aktiviertem Waferbonden

Da Plasma-aktiviertes Wafer Bonden (PAWB) bei Raumtemperatur, und der nachfolgende Temperschnitt bei relativ niedriger Temperatur von 100°C bis 300°C ausgeführt werden kann, wird PAWB auch in dieser Arbeit für die Post-CMOS Integration des kapazitiven Drucksensors ausprobiert. Die Hauptvorteile von PAWB sind niedrige Prozesstemperatur und inhärente Sauberkeit. In diesen Jahren wurden viele Forschungen zur Verwendung von PAWB in MEMS Technologie durchgeführt [96] [97] [98].

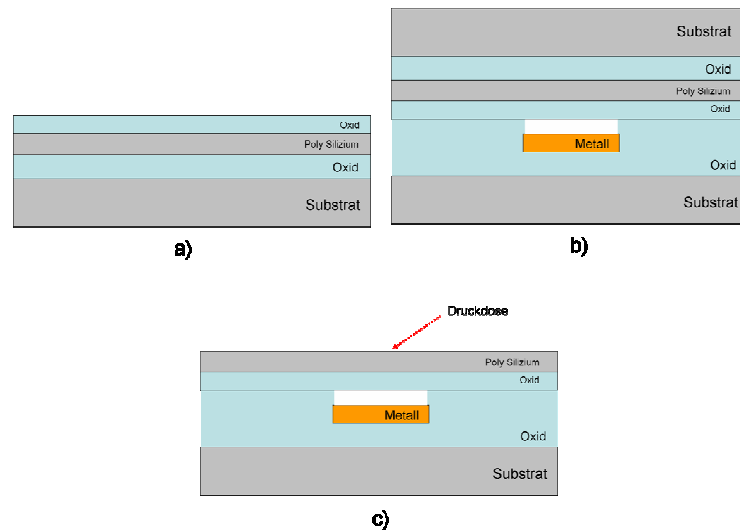
### 8.1 Herstellung der Teststruktur der Druckdose mit PAWB



**Abbildung 8.1:** Herstellung des Wafers mit Kavitäten, die als Innenraum der Druckdose dienen. a) Strukturiertes Metall auf Oxid, auf Substrat vorab abgeschieden; b) Oxid abscheiden; c) Planarisieren und Polieren mit chemisch-mechanischem Polieren (CMP); d) Kavitäten auf Metall erzeugen.

Teststrukturen für kapazitive Druckdosen widerspiegelt wurden für die Überprüfung der Ausführbarkeit der Post-CMOS-Integration der Druckdosen mit PAWB Verfahren hergestellt. Der Innenraum der Druckdose wurde dabei durch das Bonden von zwei Wafern gebildet. In einem der Wafer wurden Kavitäten im Oxid erzeugt (in diesem Abschnitt (Abschnitt 8) als „Kavität-Wafer“ bezeichnet). Auf dem anderen Wafer wurde eine Poly-Silizium-Schicht in Oxid eingebettet, die als Membran der Druckdose diente (als PSOI Wafer bezeichnet, PSOI=*poly-silicon on isolator*). Abbildung 8.1 zeigt schematisch den Prozess zur Herstellung der Wafer mit Kavitäten. Es wurden zuerst Metall-Pads auf Oxid erzeugt, die die untere Elektrode der Druckdose bilden. Danach wurde USG auf dem Wafer mit PECVD-Verfahren abgeschieden. Anschließend wurde der Wafer mit chemisch-mechanischem Polieren (CMP) planarisiert und poliert. Kavitäten auf Metall wurden mit einem RIE Prozess im Oxid erzeugt.



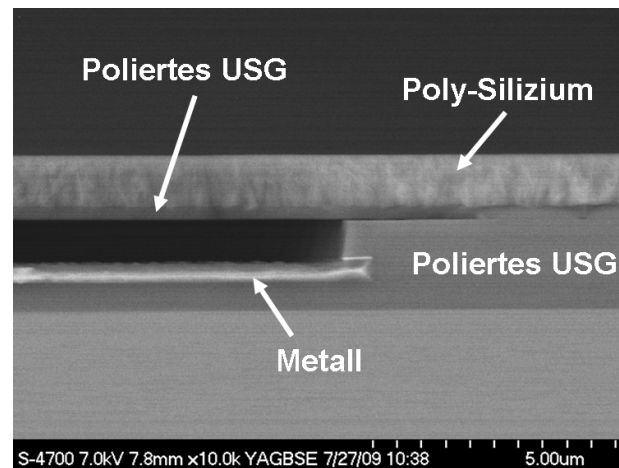


**Abbildung 8.2:** Herstellung des Wafers mit Poly-Silizium Schicht, die als Membran der Druckdose dient (PSOI Wafer), und der PAWB Prozess für das Bonden des PSOI-Wafers mit dem Kavität-Wafer. a) PSOI-Wafer, bei dem die Oberfläche der obersten Oxid-Schicht durch CMP poliert wird; b) PAWB des PSOI-Wafers mit dem Kavität Wafer; c) Entfernung des Substrates des PSOI-Wafers und der Oxid-Schicht zwischen dem Substrat und der Poly-Silizium-Schicht.

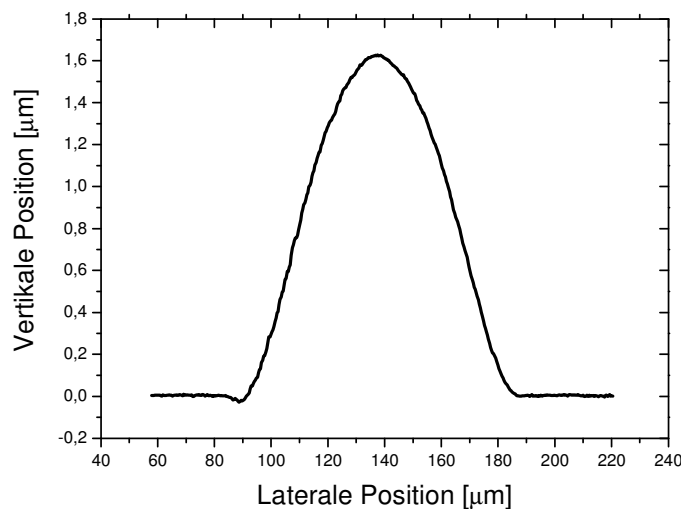
In Abbildung 8.2 ist das Bonden des PSOI-Wafers mit dem Kavität-Wafer dargestellt. Auf dem PSOI-Wafer wurde eine Poly-Silizium-Schicht in Oxid eingebettet (Abbildung 8.2 a)). Die untere Oxidschicht dient als der Ätz-Stopp bei der Entfernung des Substrates des Wafers, und die obere Oxid Schicht wird beim PAWB-Prozess mit der Oxid Schicht auf dem Kavität-Wafer gebondet. Um eine kleine Rauigkeit der Oxid-Oberfläche zu schaffen, wurde die Oberfläche der oberen Oxid Schicht durch CMP Prozess poliert. Danach wurde der PSOI Wafer mit PAWB Prozess mit Kavität-Wafer zusammen gebunden (Abbildung 8.2 b)). Das Substrat des PSOI-Wafers wurde anschließend in Tetramethylammoniumhydroxid-Lösung (TMAH) geätzt, und die Oxidschicht, die das Substrat und die Poly-Silizium-Schicht trennte, wurde mit verdünnter HF entfernt. So bestand eine Membran aus einem Schicht-Stapel von Poly-Silizium und Oxid über der Kavität.

Die wichtigsten Schritte im oben erzählten Prozess sind der CMP-Prozess und der PAWB-Prozess. Da der Erfolg des PAWB-Prozesses eine Oberflächenrauigkeit unter  $5\text{\AA}$  der beiden zu bindenden Wafer benötigt [97], muss der CMP Prozess gut optimiert werden, um ein erfolgreiches Bonden zu schaffen. In dieser Arbeit wurde eine Poliermaschine (IPEC 472) der Firma IPEC für den CMP Prozess verwendet, wobei ein Gemisch aus winzigen  $\text{SiO}_2$ -Kugeln, Deionisiertem Wasser und Ammoniak als Polierflüssigkeit diente. Die polierte Oxid-Oberfläche hat eine mittlere Rauigkeit (*root-mean-squared roughness*) von circa  $2,3\text{\AA}$ . Beim PSOI Wafer wurden nach dem CMP-Schritt Kavitäten auf dem Wafer mit Photolithographie- und RIE-Prozess hergestellt. Die dazugehörige Bearbeitung hat keinen Einfluss auf die Oberflächenrauigkeit der Oxid-Oberfläche gehabt. Da auf dem

Kavität-Wafer Strukturen unter der obersten Oxid-Schicht vorhanden sind, muss relativ dickes Oxid beim CMP-Prozess weg poliert werden, um eine gute Planarität der Wafer-Oberfläche zu bekommen.



**Abbildung 8.3:** REM Aufnahme einer mit PAWB hergestellten Druckdose.



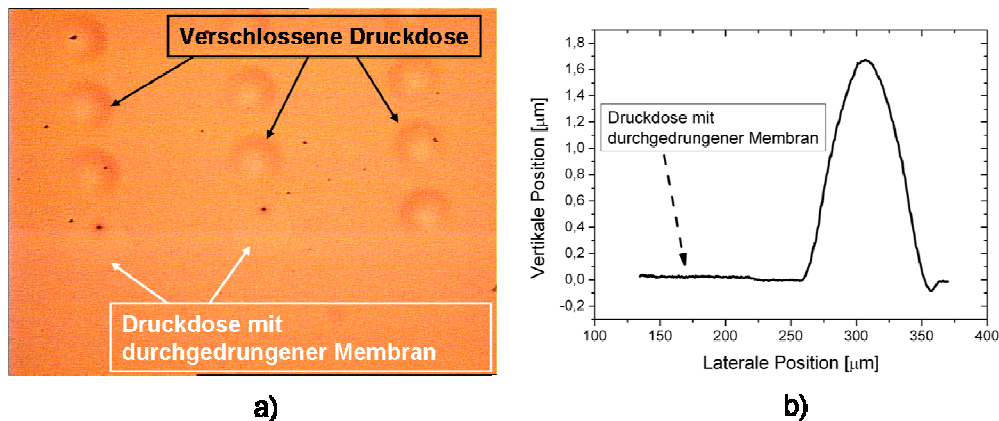
**Abbildung 8.4:** Profil durch die Mitte einer mit PAWB hergestellten Druckdose, bei 1atm aufgenommen, deren Durchmesser 97µm beträgt.

Der PAWB-Prozess wurde mit einem Wafer-Bonder (AWB-08) der Firma *Applied Microengineering Ltd* durchgeführt. Der PSOI-Wafer und der Kavität-Wafer wurden in einem Vakuum von  $5,5 \times 10^{-5}$  mbar gebondet. Die beiden Wafer wurden vor dem Bonden einem  $O_2/H_2O$  Plasma ausgesetzt, um die Oberfläche zu aktivieren. Die gebondeten Wafer wurden danach in  $N_2$  bei  $200^\circ C$  für 2 Stunden getempert. Das so bearbeitete Wafer-Paar hat eine Bond-Stärke von circa  $2,4 J/m^2$ . In

Abbildung 8.3 ist eine REM Aufnahme einer mit PAWB hergestellten Druckdose dargestellt.

## 8.2 Charakterisieren der mit PAWB hergestellten Druckdose

Die Durchbiegung der Membran der mit PAWB hergestellten Druckdose wurde mit dem optischen Profilometer gemessen. In Abbildung 8.4 wird das Profil durch die Mitte einer mit PAWB hergestellten Druckdose gezeigt. Der Durchmesser der Druckdose beträgt  $97\mu\text{m}$ . Eine Aufwölbung von circa  $1,6\mu\text{m}$  im Zentrum der Druckdose wurde beobachtet. Es wurde gezeigt, dass diese Aufwölbung durch Ausgasung entstand. Die Membran von einigen Druckdosen wurden mit einem Lasercutter geschnitten, damit der Innen- und Außendruck der Druckdose gleich ist. Nach dem Laser-Schneiden wurde die Membran der Druckdose eben, da das Gas, das in der Druckdose geschlossen wurde, wieder ausgelassen wurde.

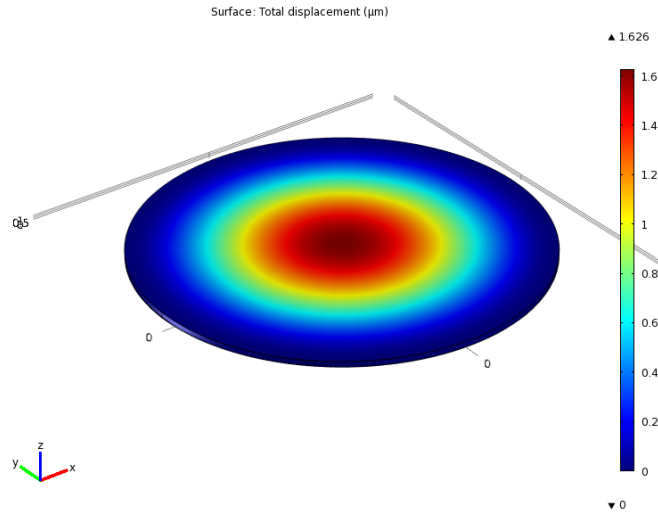


**Abbildung 8.5:** Lichtmikroskop Aufnahme der mit PAWB hergestellten Druckdosen, einige von denen mit durchgedrungener Membran sind a); Profil durch die Mitte einer verschlossenen Druckdose und einer Druckdose mit durchgedrungener Membran b).

Abbildung 8.5 zeigt eine Lichtmikroskop-Aufnahme der Druckdose mit der durch den Lasercutter durchbohrten Membran, und das Oberflächen-Profil durch die Mitte einer verschlossenen Druckdose und einer Druckdose mit geöffneter Membran. Die glatte Membran, die nach dem Durchdringen der Membran entsteht, deutet an, dass die Eigenspannung im Schicht-Stapel, der die Membran der Druckdose bildet, sehr gering ist, und die Aufwölbung der verschlossenen Druckdose von der Ausgasung stammt.

In Abbildung 8.6 ist die mit *COMSOL Multiphysics* durchgeführte Simulation der Auslenkung der Membran der mit PAWB hergestellten Druckdose dargestellt. Bei einer Belastung von  $4,8\text{bar}$  an der Oxid-Seite, liefert die Simulation eine zentrale Durchbiegung der Druckdose von circa  $1,6\mu\text{m}$ , wie der gemessene Wert der echten Druckdose. Da die Durchbiegung der echten Druckdose beim Atmosphären-

druck außerhalb der Druckdose gemessen wurde, wird der Innendruck der echten Druckdose gemäß der Simulation zu circa 5,8bar abgeschätzt. Weil das PAWB bei einem geringen Druck von  $5,5 \times 10^{-5}$  mbar durchgeführt wurde, kann behauptet werden, dass große Menge von Gas während dem Tempern Schritt in den Innenraum der Druckdose gesammelt wurde.



**Abbildung 8.6:** Simulation der Auslenkung der Membran der mit PAWB hergestellten Druckdose, bei einer Belastung an der Oxid-Seite von 4,8 bar.

Die Ausgasung stammt aus drei Quellen:

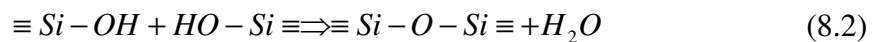
1. Aus den mit PECVD abgeschiedenen USG-Schichten.
2. Aus der Metallschicht.
3. Reaktionsprodukte von Wasser und Silizium.

Wegen der Nichtgleichgewichtsnatur des PECVD-Verfahrens werden Reaktionsbeiprodukte und Gas-Moleküle während des PECVD Prozesses in die abgeschiedene Schicht integriert. Sie können in nachfolgenden Prozessierungen ausgasen [99]. Beiprodukte aus der Wasser-Silizium-Reaktion ist eine andere wichtige Quelle der Ausgasung. Die hydrophile Oberflächen der Oxid-Schicht auf den beiden zu bondenden Wafern adsorbieren Wasser vor und bei dem PAWB. Das adsorbierte Wasser verursacht die Oxidation des Siliziums und die Bildung des molekularen Wasserstoffs, durch die Reaktion [54]



Der produzierte Wasserstoff sammelt in den verschlossenen Innenraum der Druckdose.

Die ersten zwei Quellen für die Ausgasung können durch bestimmte Prozessierung des Wafers unterdrückt werden. Die beiden zu bondenden Wafer können vor PAWB mit einem Temper-Schritt bearbeitet werden, um die Gas-Moleküle aus der USG-Schicht und der Metall-Schicht zu treiben. Beim geplanten praktischen Integrationsprozess soll ein dünnes Dielektrikum auf dem Metall abgeschieden werden, um die beiden Elektroden zu isolieren. Wenn geeignetes Material und passende Abscheidungsmethode gewählt werden, kann diese Schicht auch als Diffusionsbarriere gegen Ausgasung aus dem Metall dienen. Allerdings kann die dritte Quelle für die Ausgasung nicht völlig vermieden werden. Obwohl das auf der Oxid-Oberfläche adsorbierte Wasser durch in-situ Aufheizen der beiden Wafer vor dem Bonden entfernt werden kann, kann Wasser als ein Reaktionsprodukt beim Temper-Schritt nach dem Bonden durch die Reaktion



entstehen. Dieses so entstandene Wasser kann gemäß Reaktionsgleichung 8.1 molekularen Wasserstoff produzieren, und der Wasserstoff kann in der Druckdose gesammelt werden. Jedoch ist der so produzierte Wasserstoff in sehr kleiner Menge, und nicht drastisch für das Innenvakuum der Druckdose. Außerdem kann die Zunahme des Innendrucks der Druckdose durch Erhöhung der Dichte der Kavitäten beeinträchtigt werden [54]. Das heißt, dass außerhalb der Druckdosen zusätzliche Dummy-Kavitäten auf dem Wafer eingerichtet werden sollen. Auf dieser Weise wird das bei der Ausgasung entstehende Gas in mehr Kavitäten verteilt. Somit wird der Einfluss der Ausgasung auf die einzelnen Druckdosen verringert. Um die Druckdose mit sehr gutem Innenvakuum herzustellen, muss Getter in der Druckdose verwendet werden.

### 8.3 Zusammenfassung

Eine verschlossene Druckdose wurde mittels des PAWB Prozesses durch das Bonden von zwei Wafern hergestellt. Diese Druckdose hat eine gute Dichtheit gezeigt. Allerdings wurde ein deutliches Ausgasungsproblem beobachtet, das zu einer starken Ausbeulung der Druckdose führte. Die Ausgasung stammt aus den mittels PECVD abgeschiedenen Schichten und dem Bond-Interface.

Obwohl das Ausgasungsproblem beobachtet wurde, bleibt das Konzept mit PAWB eine gute Variante für die Post-CMOS-Integration der Druckdose. Die Ausgasung aus den PECVD Schichten kann durch einen Temper-Schritt vor dem Verschließen der Druckdose unterdrückt werden. Wenn viele Dummy-Kavitäten eingerichtet werden, kann der Effekt der Ausgasung aus dem Bonden-Interface auch stark reduziert werden. Der einzigartige Vorteil des PAWB Konzeptes ist die Möglichkeit, eine fast spannungsfreie einkristalline Silizium-Membran für die Druckdose einzusetzen.

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

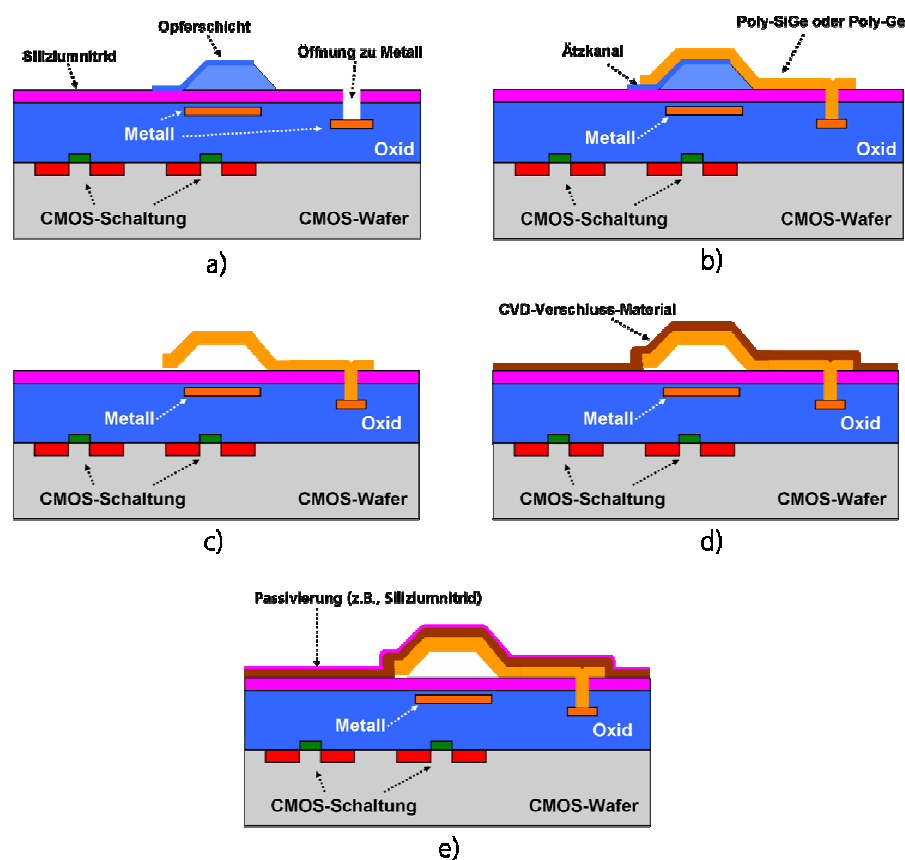
Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Verfahrens für die Integration der Druckdose mit der Auslese- und Ansteuerelektronik. Dafür wurden verschiedene Integrationsmethoden theoretisch untersucht, und drei konkrete Post-CMOS-Integrationskonzepte für experimentelle Untersuchung bestimmt, nämlich die Herstellung der Druckdose mit SiGe- oder Ge-Membran, die Herstellung der Druckdose mit a-Si-Membran und die auf PAWB basierende Integration. Diese Integrationskonzepte wurden experimentell untersucht, um Ausführbarkeit und Entwicklungsaufwand zu ermitteln. Für die Herstellung der Druckdose-Membran wurde eine neue Abscheidungs-methode für Poly-SiGe/-Ge entwickelt, und wurden die Eigenschaften von SiGe-, Ge- und a-Si Schichten erforscht [100].

Mit zunehmendem gesamtem Gasfluss wird die Verweilzeit der Gasteilchen in der Prozesskammer bei der PECVD-Abscheidung reduziert. Diese verkürzte Verweilzeit führte zu einer verbesserten Kristallinität der abgeschiedenen SiGe Schichten. Mit der Variation der Verweilzeit wird die chemische Zusammensetzung der abgeschiedenen SiGe-Schichten beeinflusst. Je kürzer die Gasteilchen-Verweilzeit ist, desto mehr Ge-Atome werden in die abgeschiedene SiGe-Schicht eingebaut. Dieser Effekt ist auf die verschiedene Bindungsenergie von Ge-H und Si-H Bindung zurückgeführt. Da die amorph-kristalline Übergangstemperatur der SiGe-Schicht mit zunehmendem Ge-Gehalt niedriger wird, wird die Kristallinität der bei einer bestimmten Temperatur abgeschiedenen SiGe Schichten mit zunehmendem Ge-Gehalt verbessert. In dieser Arbeit wurde Poly-SiGe mit einem spezifischen Widerstand von  $1,4\text{m}\Omega\text{cm}$  und einem Ge-Gehalt von circa 80% bei einer Substrat-Temperatur von  $375^\circ\text{C}$  mit PECVD Prozess abgeschieden.

Es wurde beobachtet, dass sich die mechanische Spannung der auf Siliziumnitrid abgeschiedenen SiGe/Ge-Schichten von der auf USG abgeschiedenen SiGe/Ge-Schichten unterscheidet. Durchkontaktierung aus Poly-SiGe und Poly-Ge wurde hergestellt. Eine Temperatur-Abhängigkeit des Widerstandes der SiGe/Ge Durchkontaktierungen wurde beobachtet. Das stammt aus den negativen TCR der Poly-SiGe oder -Ge Materialien. Die Vorteile der Durchkontaktierung aus Poly-SiGe oder -Ge liegen an dem vereinfachten Integrationsprozess und dem großen Strom, der durch die Durchkontaktierung fließen darf. In dieser Arbeit wird ein Strom von 6mA durch eine SiGe- oder Ge-Durchkontaktierung fließen gelassen, die einen quadratischen Querschnitt mit einer Kantenlänge von  $1,2\mu\text{m}$  und eine Höhe von 900nm hat.

Test-Druckdosen mit SiGe- und Ge-Membran wurden hergestellt, wobei eine offene Membran aus Poly-SiGe oder Poly-Ge zuerst über der Kavität produziert wurde, und danach die Druckdose mit CVD-Verschlussmaterial verschlossen wurde. Ein Tempern in Vakuum vor dem Verschluss der Druckdose, unter  $450^\circ\text{C}$  für

90min für SiGe Druckdose und unter 400°C für 70min für Ge-Druckdose, gewährleistet ein gutes Vakuum innerhalb der Druckdose. Eine einfache Abschätzungsmethode mit Hilfe vom Durchbohren der Druckdose-Membran mit einem Lasercutter wird für die Abschätzung des Innendrucks der Druckdose entwickelt. Die Charakterisierung der Druckempfindlichkeit der verschlossenen Druckdosen wurde mit Messung der zentralen Durchbiegung der Druckdosen-Membran bei verschiedenen Druckbelastungen durchgeführt. Die zentralen Durchbiegungen der verschlossenen Druckdosen nach einer Lagerung der Druckdosen in Atmosphäre bei Raumtemperatur von sieben Monaten bleiben konstant, im Vergleich mit den ersten Messergebnissen. Das verifiziert die Dichtheit der verschlossenen Druckdose.



**Abbildung 9.1:** Prozessablauf der Post-CMOS Integration der SiGe/Ge Druckdose mit Poly-SiGe/Poly-Ge Durchkontaktierung auf unterer Metall-Ebene.

Experimentelle Ergebnisse zeigen, dass das Konzept mit der SiGe/Ge-Druckdose-Membran eine sehr gut ausführbare Post-CMOS Integrationsmethode darstellt. Mit Kombination von Poly-SiGe- oder Poly-Ge-Durchkontaktierung und Druckdose mit SiGe- oder Ge-Membran kann eine Post-CMOS-Integration der kapazitiven Druckdose erfolgreich durchgeführt werden. Die Poly-SiGe- oder Poly-Ge-Durchkontaktierung ist dabei nicht unbedingt notwendig, da eine herkömmliche

Metall-Durchkontaktierung ebenfalls mit SiGe- oder Ge-Druckdose kombiniert werden kann.

Abbildung 9.1 zeigt den Prozessablauf für die Post-CMOS-Integration der Si-Ge/Ge Druckdose mit der Poly-SiGe/Poly-Ge-Durchkontaktierung auf unterer Metallebene. Nach der Strukturierung der Opferschicht werden Öffnungen zur unteren Metallebene erzeugt. Danach wird die Poly-SiGe- oder Poly-Ge-Schicht abgeschieden und strukturiert, so dass die Membran und die Durchkontaktierung zur unteren Metallebene gleichzeitig gebildet werden. Nach der Entfernung der Opferschicht werden Druckdosen mit der CVD Verschlusschicht verschlossen. Zum Ende wird eine Passivierungsschicht auf dem Wafer abgeschieden. Die Druckdosen können auch mit der Passivierungsschicht verschlossen werden, d.h., dass der Verschluss der Druckdose und die Abscheidung der Passivierungsschicht zusammengefügt werden können.

Wenn zukünftig eine Gas-Diffusionsschicht den Innenraum der Druckdose von dem mit PECVD abgeschiedenen Material trennt, kann der Tempereschritt vor dem Verschluss der Druckdose verkürzt oder weggelassen werden. Mit Atomlagenabscheidung (engl. *atomic layer deposition*, ALD) produzierte dünne Schicht (z.B. Aluminiumoxid, Titanoxid oder Tantaloxid [101] [102] [103]) ist eine gute Variante für diese Anwendung, da eine ALD-Schicht gleichmäßig und porenfrei ist.

Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass das Integrationskonzept mit Druckdosen-Membran aus a-Si keinen Vorteil besitzt, im Vergleich mit dem mit Si-Ge/Ge-Membran oder dem mit PAWB-Verfahren. Da a-Si nicht gut leitend ist, gibt es beim Integrationskonzept mit a-Si eine inhärente Komplexität. A-Si ist metastabil, was die Langzeitstabilität der Druckdose bedroht. Ausgasung der in a-Si integrierten Gas-Moleküle kann Blasen unterhalb der a-Si-Schicht und Überdruck in der Druckdose verursachen.

Obwohl starker Überdruck in der mit PAWB verschlossenen Druckdose beobachtet wurde, bleibt das Konzept noch als eine potentielle Variante für Post-CMOS Integration von Druckdose. Die Versuche zeigen eine gute Dichtheit der mit PAWB verschlossenen Druckdose. Die Ausgasung aus PECVD-Schichten könnte mit Hilfe von einem Temper-Schritt vermieden werden. Erhöhung der Dichte von Kavitäten (Dummy-Druckdosen) könnte die Druck-Zunahme in der Druckdose wegen der Ausgasung aus den Bonden-Interfaces reduzieren.







## Literaturverzeichnis

- [1] T. R. Hsu, MEMS and microsystems: design, manufacture, and nanoscale engineering. Wiley, 2008.
- [2] W. H. Ko, M. H. Bao, und Y. D. Hong, „A high-sensitivity integrated-circuit capacitive pressure transducer“, Electron Devices, IEEE Transactions on, Bd. 29, Nr. 1, S. 48–56, 2005.
- [3] M. Kandler, Y. Manoli, W. Mokwa, E. Spiegel, und H. Vogt, „A miniature single-chip pressure and temperature sensor“, Journal of Micromechanics and Microengineering, Bd. 2, S. 199, 1992.
- [4] S. Renard u. a., „Miniature pressure acquisition microsystem for wireless in vivo measurements“, in Microtechnologies in Medicine and Biology, 1st Annual International, Conference On. 2000, 2002, S. 175–179.
- [5] D. J. Young, J. Du, C. A. Zorman, und W. H. Ko, „High-temperature single-crystal 3C-SiC capacitive pressure sensor“, Sensors Journal, IEEE, Bd. 4, Nr. 4, S. 464–470, 2004.
- [6] Y. Zhang und K. D. Wise, „An ultra-sensitive capacitive pressure sensor with a bossed dielectric diaphragm“, in Tech. Dig. IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop, 1994, S. 205–208.
- [7] H. Kim, Y. G. Jeong, und K. Chun, „Improvement of the linearity of a capacitive pressure sensor using an interdigitated electrode structure“, Sensors and Actuators A: Physical, Bd. 62, Nr. 1-3, S. 586–590, 1997.
- [8] S. K. Clark und K. D. Wise, „Pressure sensitivity in anisotropically etched thin-diaphragm pressure sensors“, Electron Devices, IEEE Transactions on, Bd. 26, Nr. 12, S. 1887–1896, 2005.
- [9] R. H. Johnson, S. Karbassi, U. Sridhar, und B. Speldrich, „A high-sensitivity ribbed and bossed pressure transducer“, Sensors and Actuators A: Physical, Bd. 35, Nr. 2, S. 93–99, 1992.
- [10] A. Goehlich, H. Vogt, K. Debusmann, H. K. Trieu, J. Berg, und A. G. Kistler Instrumente, „Customized MEMS Process Development: a Pressure Sensor for High Temperature and High Pressure Applications“, Annual Report of the Fraunhofer-Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme IMS Duisburg 2009, S. 42.
- [11] J. C. Greenwood, „Etched silicon vibrating sensor“, Journal of Physics E: Scientific Instruments, Bd. 17, S. 650, 1984.
- [12] K. Petersen, F. Pourahmadi, J. Brown, P. Parsons, M. Skinner, und J. Tudor, „Resonant beam pressure sensor fabricated with silicon fusion bonding“, in Solid-State Sensors and Actuators, 1991. Digest of Technical Papers, TRANSDUCERS'91., 1991 International Conference on, 2002, S. 664–667.

- [13] P. Melvas, E. Kalvesten, und G. Stemme, „A surface micromachined resonant beam pressure sensor“, in Micro Electro Mechanical Systems, 2001. MEMS 2001. The 14th IEEE International Conference on, 2002, S. 38–41.
- [14] S. P. Beeby, G. Ensell, B. R. Baker, M. J. Tudor, und N. M. White, „Micro-machined silicon resonant strain gauges fabricated using SOI wafer technology“, Microelectromechanical Systems, Journal of, Bd. 9, Nr. 1, S. 104–111, 2002.
- [15] K. Benaissa und A. Nathan, „IC compatible optomechanical pressure sensors using Mach-Zehnder interferometry“, Electron Devices, IEEE Transactions on, Bd. 43, Nr. 9, S. 1571–1582, 2002.
- [16] L. Reindl, C. C. W. Ruppel, K. Riek, T. Pankratz, und R. Weigel, „A wireless AQP pressure sensor using chirped SAW delay lines structures“, in Ultrasonics Symposium, 1998. Proceedings., 1998 IEEE, 2002, Bd. 1, S. 355–358.
- [17] C. Stampfer u. a., „Fabrication of single-walled carbon-nanotube-based pressure sensors“, Nano Lett, Bd. 6, Nr. 2, S. 233–237, 2006.
- [18] X. Wang, J. Zhou, J. Song, J. Liu, N. Xu, und Z. L. Wang, „Piezoelectric field effect transistor and nanoforce sensor based on a single ZnO nanowire“, Nano Lett, Bd. 6, Nr. 12, S. 2768–2772, 2006.
- [19] S. Beeby, G. Ensell, M. Kraft und N. White, MEMS mechanical sensors. Artech House, 2004.
- [20] „Car MEMS sensor sales made records in 2010“, Small Times, 03-Jan-2011.
- [21] Solid State Technology, 12-Sep-2007.
- [22] A. Witvrouw, „CMOS-MEMS integration: why, how and what?“, in Proceedings of the 2006 IEEE/ACM international conference on Computer-aided design, 2006, S. 826–827.
- [23] H. S. Yang und M. S. Bakir, „3D integration of CMOS and MEMS using mechanically flexible interconnects (MFI) and through silicon vias (TSV)“, in Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 2010 Proceedings 60th, 2010, S. 822–828.
- [24] N. Basavanahally u. a., „High-Density Solder Bump Interconnect for MEMS Hybrid Integration“, Advanced Packaging, IEEE Transactions on, Bd. 30, Nr. 4, S. 622–628, 2007.
- [25] Z. Feng, W. Zhang, B. Su, K. C. Gupta, und Y. C. Lee, „RF and mechanical characterization of flip-chip interconnects in CPW circuits with underfill“, Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, Bd. 46, Nr. 12, S. 2269–2275, 2002.
- [26] A. E. Franke, J. Heck, T. J. King, und R. T. Howe, „Polycrystalline silicon-germanium films for integrated microsystems“, Microelectromechanical Systems, Journal of, Bd. 12, Nr. 2, S. 160–171, 2003.

- [27] J. H. Smith, S. Montague, J. J. Sniegowski, J. R. Murray, und P. J. McWhorter, „Embedded micromechanical devices for the monolithic integration of MEMS with CMOS“, in Electron Devices Meeting, 1995., International, 2002, S. 609–612.
- [28] H. K. Trieu, M. Knier, O. Koster, H. Kappert, M. Schmidt, und W. Mokwa, „Monolithic integrated surface micromachined pressure sensors with analog on-chip linearization and temperature compensation“, in Micro Electro Mechanical Systems, 2000. MEMS 2000. The Thirteenth Annual International Conference on, 2000, S. 547–550.
- [29] S. Sedky, Post-processing techniques for integrated MEMS. Artech House, 2006.
- [30] S. M. Rossnagel, J. J. Cuomo, und W. D. Westwood, Handbook of plasma processing technology. Noyes Publications Park Ridge (NJ), 1990.
- [31] I. Langmuir, „The interaction of electron and positive ion space charges in cathode sheaths“, Phys Rev, Bd. 33, S. 954, 1913.
- [32] S. Wolf, Microchip manufacturing. Lattice press, 2004.
- [33] A. Grill, Cold plasma in materials fabrication: from fundamentals to applications. IEEE press New York, 1994.
- [34] E. A. Truesdale, G. Smolinsky, und T. M. Mayer, „The effect of added acetylene on the rf discharge chemistry of CF. A mechanistic model for fluorocarbon plasmas“, Journal of Applied Physics, Bd. 51, S. 2909, 1980.
- [35] B. Chapman, „Glow discharge processes: sputtering and plasma etching“, 1980.
- [36] M. Zeuner, H. Neumann, und J. Meichsner, „Pressure and Electrode Distance Effects on Ion Energy Distributions in RF Discharges“, Jpn. J. Appl. Phys. Vol, Bd. 36, S. 4711–4716, 1997.
- [37] B. Guo u. a., „Improvement of PECVD Silicon–Germanium Crystallization for CMOS Compatible MEMS Applications“, Journal of the Electrochemical Society, Bd. 157, S. D103, 2010.
- [38] S. P. Timoshenko und J. N. Goodier, Theory of elasticity. McGraw, New York, 1970.
- [39] X. Zhang, K. S. Chen, R. Ghodssi, A. A. Ayon, und S. M. Spearing, „Residual stress and fracture in thick tetraethylorthosilicate (TEOS) and silane-based PECVD oxide films“, Sensors and Actuators A: Physical, Bd. 91, Nr. 3, S. 373–380, 2001.
- [40] B. C. Lin, T. J. King, und R. S. Muller, „Poly-SiGe MEMS actuators for adaptive optics“, in Proceedings of SPIE, 2006, Bd. 6113, S. 61130S.
- [41] L. E. In, Physics of Thin Films. Oxford Univ. Press, Oxford, 1986.

- [42] S. G. Malhotra, Z. U. Rek, S. M. Yalisove, and J. C. Bilello, „Analysis of thin film stress measurement techniques“, *Thin Solid Films*, Bd. 301, Nr. 1-2, S. 45–54, 1997.
- [43] G. G. Stoney, „The tension of metallic films deposited by electrolysis“, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, S. 172–175, 1909.
- [44] H. P. Klug und L. E. Alexander, „X-ray diffraction procedures: for polycrystalline and amorphous materials“, 1974.
- [45] I. C. Noyan und J. B. Cohen, „Residual Stress–Measurement by Diffraction and Interpretation“, Springer, Berlin, 1987.
- [46] T. Y. Zhang, L. Q. Chen, und R. Fu, „Measurements of residual stresses in thin films deposited on silicon wafers by indentation fracture“, *Acta Materialia*, Bd. 47, Nr. 14, S. 3869–3878, 1999.
- [47] L. Lin, A. P. Pisano, und R. T. Howe, „A micro strain gauge with mechanical amplifier“, *Microelectromechanical Systems, Journal of*, Bd. 6, Nr. 4, S. 313–321, 2002.
- [48] C. C. Lee, C. L. Tien, W. S. Sheu, und C. C. Jaing, „An apparatus for the measurement of internal stress and thermal expansion coefficient of metal oxide films“, *Review of Scientific Instruments*, Bd. 72, Nr. 4, S. 2128–2133, 2009.
- [49] G. Janssen, M. M. Abdalla, F. Van Keulen, B. R. Pujada, und B. Van Venrooy, „Celebrating the 100th anniversary of the Stoney equation for film stress: Developments from polycrystalline steel strips to single crystal silicon wafers“, *Thin Solid Films*, Bd. 517, Nr. 6, S. 1858–1867, 2009.
- [50] R. W. Hoffman, „Physics of thin films“, Academic, New York, S. 211, 1966.
- [51] S. Timoshenko, S. Woinowsky-Krieger, und S. Woinowsky, *Theory of plates and shells*, Bd. 580. McGraw-Hill New York, 1959.
- [52] W. D. Nix, „Mechanical properties of thin films“, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Bd. 20, Nr. 11, S. 2217–2245, 1989.
- [53] H. R. Clauser, R. Fabian, D. Peckner, und M. W. Riley, *The encyclopedia of engineering materials and processes*. Reinhold Pub. Corp., 1963.
- [54] U. Gösele u. a., „Wafer bonding for microsystems technologies“, *Sensors and Actuators A: Physical*, Bd. 74, Nr. 1-3, S. 161–168, 1999.
- [55] S. Sedky, A. Witvrouw, K. Baert, M. Caymax, und C. Rusu, METHOD FOR DEPOSITING POLYCRYSTALLINE SIGE SUITABLE FOR MICROMACHINING AND DEVICES OBTAINED THEREOF. WO Patent WO 01/74708, 2001.
- [56] A. Witvrouw u. a., „Poly-SiGe: A Superb Material for MEMS“, in *MATERIALS RESEARCH SOCIETY SYMPOSIUM PROCEEDINGS*, 2004, Bd. 782, S. 25–36.

- [57] A. Mehta u. a., „Novel high growth rate processes for depositing poly-SiGe structural layers at CMOS compatible temperatures“, in *Micro Electro Mechanical Systems*, 2004. 17th IEEE International Conference on MEMS, 2005, S. 721–724.
- [58] S. Hazra, A. R. Middy, S. Ray, C. Malten, und F. Finger, „Role of deposition parameters on the photovoltaic quality of amorphous silicon germanium alloys: correlation of microstructure with defect density and electronic transport“, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Bd. 34, S. 2475, 2001.
- [59] R. Robertson und A. Gallagher, „Reaction mechanism and kinetics of silane pyrolysis on a hydrogenated amorphous silicon surface“, *The Journal of chemical physics*, Bd. 85, S. 3623, 1986.
- [60] J. M. PERRIN, „Deposition of amorphous silicon alloys“, *Pure & Appl. Chem*, Bd. 62, S. 1681–1688, 1990.
- [61] M. Quirk und J. Serda, *Semiconductor manufacturing technology*. Prentice Hall, 2001.
- [62] S. K. Ghandhi, *VLSI fabrication principles: silicon and gallium arsenide*. Wiley-Interscience, 1994.
- [63] H. Cole, „Bragg’s law and energy sensitive detectors“, *Journal of Applied Crystallography*, Bd. 3, Nr. 5, S. 405–406, 1970.
- [64] H. Ehrenreich, F. Seitz, und F. Spaepen, *Solid state physics*. Academic Pr, 2001.
- [65] M. J. Almond, A. M. Doncaster, P. N. Noble, und R. Walsh, „Ge-H Bond Strengths in Germanes“, *J. Am. Chem. Soc.*, Bd. 104, S. 4717, 1982.
- [66] R. Wiechert, „Moderne Probleme der Steroide“, *Angewandte Chemie*, Bd. 82, Nr. 9, S. 331–342, 1970.
- [67] H. P. Klug und L. E. Alexander, „X-ray diffraction procedures: for polycrystalline and amorphous materials“, 1974.
- [68] J. R. Doyle, D. A. Doughty, und A. Gallagher, „Plasma chemistry in silane/germane and disilane/germane mixtures“, *Journal of applied physics*, Bd. 71, Nr. 10, S. 4727–4738, 1992.
- [69] J. R. Doyle, D. A. Doughty, und A. Gallagher, „Germane discharge chemistry“, *Journal of applied physics*, Bd. 69, Nr. 8, S. 4169–4177, 1991.
- [70] J. R. Doyle, D. A. Doughty, und A. Gallagher, „Silane dissociation products in deposition discharges“, *Journal of applied physics*, Bd. 68, Nr. 9, S. 4375–4384, 1990.
- [71] G. E. McGuire, *Semiconductor Materials and Process Technology Handbook for Very Large Scale Integration(VLSI) and Ultra Large Scale Integration(ULSI)*, Noyes Publications. 1988.

- [72] M. Weiler, K. Lang, E. Li, und J. Robertson, „Deposition of tetrahedral hydrogenated amorphous carbon using a novel electron cyclotron wave resonance reactor“, Applied physics letters, Bd. 72, S. 1314, 1998.
- [73] A. Pastol und Y. Catherine, „Optical emission spectroscopy for diagnostic and monitoring of CH<sub>4</sub> plasmas used for aC: H deposition“, Journal of Physics D: Applied Physics, Bd. 23, S. 799, 1990.
- [74] M. Gromova, A. Mehta, K. Baert, und A. Witvrouw, „Characterization and strain gradient optimization of PECVD poly-SiGe layers for MEMS applications“, Sensors and Actuators A: Physical, Bd. 130, S. 403–410, 2006.
- [75] K. Baert, M. Caymax, C. Rusu, S. Sedky, und A. Witvrouw, „METHOD FOR DEPOSITING POLYCRYSTALLINE SIGE SUITABLE FOR MICROMACHINING AND DEVICES OBTAINED THEREOF“, U.S. Patent US 7,176,111Feb-2007.
- [76] S. Kannan, C. Taylor, und D. Allred, „PECVD growth of Six: Ge<sub>1-x</sub> films for high speed devices and MEMS“, Journal of Non-Crystalline Solids, Bd. 352, Nr. 9-20, S. 1272–1274, 2006.
- [77] U. Kroll, J. Meier, A. Shah, S. Mikhailov, und J. Weber, „Hydrogen in amorphous and microcrystalline silicon films prepared by hydrogen dilution“, Journal of applied physics, Bd. 80, S. 4971, 1996.
- [78] J. A. Thornton, „Substrate heating in cylindrical magnetron sputtering sources“, Thin Solid Films, Bd. 54, Nr. 1, S. 23–31, 1978.
- [79] R. Chow und R. F. Bunshah, „Model for Calculating the Deposit Temperature in High-Rate Physical-Vapor-Deposition Process“, Journal of Vacuum Science and Technology, Bd. 8, Nr. 6, S. VM73–VM78, 1971.
- [80] H. Kersten, H. Deutsch, H. Steffen, G. M. W. Kroesen, und R. Hippler, „The energy balance at substrate surfaces during plasma processing“, Vacuum, Bd. 63, Nr. 3, S. 385–431, 2001.
- [81] H. Steffen, H. Kersten, und H. Wulff, „Investigation of the energy transfer to the substrate during titanium deposition in a hollow cathode arc“, Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, Bd. 12, Nr. 5, S. 2780–2783, 1994.
- [82] H. Kersten, D. Steffen, und others, „On the ion energy transfer to the substrate during titanium deposition in a hollow cathode arc discharge“, Vacuum, Bd. 46, Nr. 3, S. 305–308, 1995.
- [83] Eine interner Bericht von ELMOS Semiconductor AG (nicht veröffentlicht).
- [84] S. Chang und S. Sivoththaman, „Development of a low temperature MEMS process with a PECVD amorphous silicon structural layer“, Journal of Micromechanics and Microengineering, Bd. 16, S. 1307, 2006.



- [85] M. A. Eyoun und T. J. King, „Low-resistance silicon-germanium contact technology for modular integration of MEMS with electronics“, Journal of the Electrochemical Society, Bd. 151, S. J21, 2004.
- [86] H. VOGT, M. RUSS, und Q. WANG, „OPTISCHE EMPFÄNGERSTRUKTUR UND VERFAHREN ZUMHERSTELLEN DERSELBEN“, Deutsche Patentanmeldung 102010029290.7-33.
- [87] R. E. Jones Jr und L. D. Smith, „Contact spiking and electromigration passivation cracking observed for titanium layered aluminium metallization“, in Proceedings VLSI Multilevel Interconnections Conf, 1985, Bd. 194.
- [88] J. G. Chern, W. G. Oldham, und N. Cheung, „Contact-electromigration-induced leakage failure in aluminum-silicon to silicon contacts“, Electron Devices, IEEE Transactions on, Bd. 32, Nr. 7, S. 1341–1346, 1985.
- [89] S. Ishihara, M. Kitagawa, und T. Hirao, „Low-temperature crystallization of hydrogenated amorphous silicon films in contact with evaporated aluminum electrodes“, Journal of applied physics, Bd. 62, Nr. 3, S. 837–840, 1987.
- [90] S. Peng, X. Shen, Z. Tang, und D. He, „Low-temperature Al-induced crystallization of hydrogenated amorphous  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  ( $0.2 \leq x \leq 1$ ) thin films“, Thin Solid Films, Bd. 516, Nr. 8, S. 2276–2279, 2008.
- [91] L. I. Ming, W. Ming, R. Hua, und L. I. Hong-Pu, „A novel analytical approach for multi-layer diaphragm-based optical microelectromechanical-system pressure sensors“, Chinese Physics Letters, Bd. 23, S. 1211, 2006.
- [92] G. Rizzo u. a., „A novel monolithic active pixel detector in  $0.13 \mu\text{m}$  triple well CMOS technology with pixel level analog processing“, Nuclear instruments & methods in physics research. Section A, Accelerators, spectrometers, detectors and associated equipment, Bd. 565, Nr. 1, S. 195–201, 2006.
- [93] M. Deshpande und L. Saggere, „An analytical model and working equations for static deflections of a circular multi-layered diaphragm-type piezoelectric actuator“, Sensors and Actuators A: Physical, Bd. 136, Nr. 2, S. 673–689, 2007.
- [94] H. R. Shanks und L. Ley, „Formation of pin holes in hydrogenated amorphous silicon at high temperatures and the yield strength of a-Si: H.“, Journal of Applied Physics, Bd. 52, Nr. 2, S. 811–813, 1981.
- [95] Y. Mishima und T. Yagishita, „Investigation of the bubble formation mechanism in a-Si: H films by Fourier-transform infrared microspectroscopy“, Journal of applied physics, Bd. 64, Nr. 8, S. 3972–3974, 1988.
- [96] V. Dragoi, G. Mittendorfer, C. Thanner, und P. Lindner, „Plasma-activated wafer bonding: the new low-temperature tool for MEMS fabrication“, in Proceedings of SPIE, 2007, Bd. 6589, S. 65890T.
- [97] T. Suni, K. Henttinen, A. Lipsanen, J. Dekker, H. Luoto, und M. Kulawski, „Wafer scale packaging of MEMS by using plasma-activated wafer bonding“, Journal of the Electrochemical Society, Bd. 153, S. G78, 2006.

- [98] M. A. Schmidt, „Wafer-to-wafer bonding for microstructure formation“, Proceedings of the IEEE, Bd. 86, Nr. 8, S. 1575–1585, 1998.
- [99] C. S. Tan, A. Fan, K. N. Chen, und R. Reif, „Low-temperature thermal oxide to plasma-enhanced chemical vapor deposition oxide wafer bonding for thin-film transfer application“, Applied physics letters, Bd. 82, S. 2649, 2003.
- [100] Q. Wang, A. Göhlich, und H.-K. Trieu, „Post-CMOS MEMS integration based on novel approach with Ge micromechanics“, Annual Report of the Fraunhofer-Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme IMS Duisburg 2010, S. 36-38.
- [101] S. J. Yun, K. H. Lee, J. Skarp, H. R. Kim, und K. S. Nam, „Dependence of atomic layer-deposited Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films characteristics on growth temperature and Al precursors of Al (CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub> and AlCl<sub>3</sub>“, Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, Bd. 15, Nr. 6, S. 2993–2997, 1997.
- [102] J. Aarik, A. Aidla, T. Uustare, und V. Sammelselg, „Morphology and structure of TiO<sub>2</sub> thin films grown by atomic layer deposition“, Journal of crystal growth, Bd. 148, Nr. 3, S. 268–275, 1995.
- [103] K. Kukli, M. Ritala, R. Matero, und M. Leskela, „Influence of atomic layer deposition parameters on the phase content of Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> films“, Journal of crystal growth, Bd. 212, Nr. 3-4, S. 459–468, 2000.